



**Universidade de  
Aveiro  
2011**

Departamento de Engenharia Civil

**Américo Pedro  
Pereira Marcos**

**Estabilização Temporária de Areias por  
Congelamento**





**Universidade de  
Aveiro  
2011**

Departamento de Engenharia Civil

**Américo Pedro  
Pereira Marcos**

## **Estabilização Temporária de Areias por Congelamento**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



“Não acuse a natureza, ela faz a parte que lhe cabe. Agora, faça a sua.”

(John Milton)



**o júri**

Presidente

**Prof. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes**

professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Fernando Joaquim Tavares Rocha**

professor Catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Aos meus pais, pela oportunidade que me proporcionaram e pelo apoio e força incondicionais na realização do curso e desta última caminhada.

À minha irmã, pela sua preocupação, motivação e ajuda permanentes.

À minha namorada, pelo incentivo e apoio constantes durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Agostinho Benta, pelo apoio e orientação ao longo do desenvolvimento da dissertação.

A todos os meus amigos, aos meus companheiros de curso e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.



**palavras - chave**

Estabilização temporária, melhoramento de solos, congelamento artificial, modelação.

**resumo**

Existem no mercado da construção civil inúmeras técnicas de estabilização de solos. Neste documento pretende-se aprofundar o conhecimento acerca da técnica de congelamento de solos. Inicialmente é feita uma apresentação sobre o funcionamento da técnica e suas características. No seguimento do trabalho são realizados ensaios laboratoriais, onde se procede ao congelamento de água e de areia, sendo os resultados obtidos comparados com os dos modelos teóricos, resolvidos no software TEMP/W<sup>®</sup>. Finalmente é feita uma análise, de carácter económico, tendo em conta os gastos envolvidos no processo de congelamento da areia.



**keywords**

Temporary stabilization, soil improvement, artificial freezing, modeling.

**abstract**

In the construction market exists a huge variety of soils stabilization techniques . With this document we intend to explore the knowledge about the technique of freezing soils. Initially, is made a presentation on how the technique works and their characteristics. Then are carried out laboratory tests, that consists on the freezing of water and sand on which results are compared with the ones done with use of theoretical models, solved by a software called TEMP/W<sup>®</sup>. Finally is made a discussion about the economic importance of this technique, taking into account the costs involved on the process of freezing sand.



## ÍNDICE GERAL

Índice geral .....	I
Índice de figuras .....	V
Índice de tabelas.....	IX
Símbolos e Acrónimos .....	XI
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Enquadramento do problema .....	1
1.3. Objectivos .....	3
1.4. Metodologia/Estrutura do trabalho .....	3
2. Congelamento de solos .....	5
2.1. Princípio do congelamento.....	5
2.1.1. Comportamento do solo congelado.....	7
2.2. Refrigerantes usados no congelamento.....	9
2.2.1. Salmoura.....	9
2.2.2. Nitrogénio ou Azoto Líquido.....	10
2.3. Processo de execução.....	12
2.4. Campos de aplicação .....	12
2.4.1. Exemplos reais de aplicações da técnica .....	13
3. Outros Métodos de Estabilização de Solos .....	21
3.1. Introdução .....	21
3.1.1. Substituição do solo .....	22
3.1.2. Adição de elementos de estabilização .....	22
3.1.3. Compactação dinâmica .....	23
3.1.4. Vibro - Compactação .....	23
3.1.5. Compactação através de explosivos.....	24
3.1.6. Vibro - Substituição .....	24
3.1.7. Jet Grouting .....	25
3.1.8. Soil Mixing .....	26
4. Ensaio Experimentais.....	29
4.1. Ensaio Triaxial .....	29
4.1.1. Modelo MTS-810 .....	29
4.1.2. Modelo W3Z-200.....	30
4.2. Ensaio ao fluxo e permeabilidade ao ar .....	30

4.3.	Ensaio de capacidade de suporte (CBR - Califórnia) .....	31
4.4.	Ensaio de Pré-consolidação.....	31
4.5.	Ensaio Pressiométrico .....	32
4.5.1.	Determinação de parâmetros mecânicos .....	34
5.	Parâmetros e Propriedades de solos congelados .....	37
5.1.	Parâmetros Mecânicos.....	37
5.1.1.	Resistência ao Corte .....	39
5.1.2.	Variação dos parâmetros mecânicos de solos congelados com diversos parâmetros.....	40
5.2.	Condutividade Térmica e Salinidade.....	42
5.2.1.	Mecanismo de congelamento de areias .....	42
5.3.	Volume de Água Não Congelada.....	43
5.4.	Variações de parâmetros mecânicos em solos congelados artificialmente - caso de estudo 1.....	43
5.5.	Propriedades físicas de solos congelados através da medição por técnicas de ultra-som .....	47
5.5.1.	Determinação directa de parâmetros dinâmicos de solos congelados .....	47
5.5.2.	Resistência à compressão uniaxial e velocidades ultra-sónicas em solos congelados .....	49
6.	Introdução ao software TEMP/W <sup>®</sup> - Análise Térmica .....	51
6.1.	Introdução .....	51
6.2.	Estabilização de solos através de congelamento - Análise TEMP/W <sup>®</sup> .....	52
6.2.1.	Congelamento em torno de condutas refrigeradas - análise TEMP/W <sup>®</sup> ....	53
6.3.	Propriedades de materiais pré definidos pelo software.....	54
6.3.1.	Condutividade térmica .....	55
6.3.2.	Capacidade térmica volumétrica .....	56
7.	Ensaio Laboratoriais .....	59
7.1.	Apresentação do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro...59	
7.2.	Apresentação e descrição das características da areia descongelada a ensaiar .61	
7.2.1.	Análise Granulométrica .....	61
7.2.2.	Densidade das partículas .....	63
7.2.3.	Baridade .....	66
7.2.4.	Teor em água.....	67
7.2.5.	Percentagem de Vazios .....	68
7.2.6.	Permeabilidade .....	68
7.3.	Ensaio e procedimentos realizados .....	72
7.3.1.	1ª Fase - Congelamento de água.....	72



---

7.3.2.	2ª Fase - Temperaturas areia congelada .....	74
7.4.	Calibração do modelo teórico através do Software TEMP/W® - 1ª Fase .....	76
7.4.1.	Características do reservatório.....	77
7.4.2.	Condições fronteira do modelo.....	78
7.4.3.	Propriedades da água e propriedades do isolamento .....	80
7.4.4.	Resultados obtidos da modelação .....	80
7.5.	Calibração do modelo teórico através do Software TEMP/W® - 2ª Fase.....	82
7.5.1.	Características do reservatório.....	82
7.5.2.	Condições fronteira do modelo.....	82
7.5.3.	Propriedades da areia.....	83
7.5.4.	Resultados obtidos da modelação .....	84
7.6.	Tratamento de dados .....	85
7.6.1.	Resultados da comparação do modelo teórico <i>versus</i> dados reais - 1ª Fase . .....	85
7.6.2.	Resultados da comparação do modelo teórico <i>versus</i> dados reais - 2ª Fase . .....	91
7.6.3.	Consumos energéticos .....	95
7.7.	Discussão .....	96
8.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	101
8.1.	Conclusões gerais .....	101
8.2.	Desenvolvimentos futuros .....	102
	Referências bibliográficas.....	105
	Anexos .....	109
	Anexo I - Registo de temperaturas (1ª fase) .....	111
	Anexo II - Propriedades térmicas - Tabelas manual software.....	113
	Anexo III - Registo de temperaturas (2ª fase) .....	115



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Representação base de um sistema de congelamento de solos (Fonte: adaptado de SCHULTZ et al., 2008) .....	7
Figura 2.	Gráfico Tensão Uniaxial <i>Versus</i> Temperatura (Fonte: adaptado de SCHULTZ et al., 2008) .....	8
Figura 3.	Esquema de congelamento por Salmoura (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010) .....	10
Figura 4.	Esquema de uma linha de congelamento por Nitrogénio Líquido (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010) .....	12
Figura 5.	Congelamento do Túnel de Fürth (Fonte: BAYER et al., 2010) .....	14
Figura 6.	Esquema da concepção do túnel da estação de Brandenburger (Fonte: BAYER et al., 2010) .....	15
Figura 7.	Corte esquematizado dos micro-túneis na estação terminal U 55 (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010) .....	15
Figura 8.	Esquema das fundações do Museu da ilha, Berlim (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010) .....	16
Figura 9.	Secção transversal típica sob o “Cais da Rússia” (Fonte: KOCHEN, 2010) .....	17
Figura 10.	Esquema do projecto de expansão do metro de Marienplatz, Munique (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010) .....	18
Figura 11.	Planta com intersecção túnel - parede (vermelho: parede de estacas demolida) (Fonte: KIRSCH et al., 2009) .....	19
Figura 12.	Esquema do congelamento em 3 fases - 1a;1b e 2 (Fonte: KIRSCH et al., 2009) .....	20
Figura 13.	Exemplo esquemático de compactação dinâmica (fonte: KELLER, 2011) .....	23
Figura 14.	Sequência de instalação do processo de Vibro - Compactação (Fonte: KELLER, 2011) .....	24
Figura 15.	Sequência de instalação de um sistema de Vibro - Substituição (Fonte: KELLER, 2011) .....	25
Figura 16.	Diferentes tipos de Jet Grouting (Fonte: NEVES, 2010) .....	26
Figura 17.	Esquema do processo geral Soil Mixing (Fonte: RAJU et al., 2008) .....	27
Figura 18.	Ensaio Triaxial modelo MTS-810 (Fonte: adaptado de ZHANG et al., 2007) ..	29
Figura 19.	Ensaio Triaxial modelo W3Z-200 (Fonte: LIDONG-WEI et al., 2010) .....	30
Figura 20.	Ensaio à permeabilidade de um solo congelado (Fonte: adaptado de AL-HOURI et al., 2009) .....	31
Figura 21.	Ensaio de capacidade de suporte - CBR (Fonte: adaptado de HAZIRBABA et al., 2010) .....	31
Figura 22.	Ensaio de pré-consolidação (Fonte: adaptado de QI et al., 2010) .....	32
Figura 23.	Esquema geral de um pressiómetro (Fonte: SILVA, 2001) .....	33
Figura 24.	Diagrama para determinação de parâmetros mecânicos (Fonte: adaptado de YU et al., 2002) .....	35
Figura 25.	Comportamento Tensão <i>versus</i> Deformação em solos congelados (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2007) .....	38

Figura 26.	Comportamento de um solo - Teor volumétrico do gelo <i>versus</i> Taxa de deformação (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2007) .....	38
Figura 27.	Exemplo de curvas tensão de corte <i>versus</i> deformação horizontal (Fonte: adaptado de CHAMBERLAIN et al., 1985) .....	39
Figura 28.	Resistência ao corte <i>versus</i> temperatura (Fonte: adaptado de WOLFE et al., 1964).....	40
Figura 29.	Processo de congelamento de uma areia (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2004).....	42
Figura 30.	Formação de agulhas no processo de congelamento (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2004).....	43
Figura 31.	Distribuição de temperaturas ao longo de 3 e 4 semanas (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006).....	45
Figura 32.	Resistência à compressão não - confinada <i>versus</i> temperatura (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006) .....	46
Figura 33.	Distribuição de água não congelada ao longo do eixo a partir do centro (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006).....	46
Figura 34.	Relação entre velocidade de onda e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003).....	48
Figura 35.	Relação entre módulo de Young (E) e módulo de rigidez (G) e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003) .....	48
Figura 36.	Relação entre coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003) .....	49
Figura 37.	Resistência à compressão uniaxial <i>versus</i> temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003) .....	50
Figura 38.	Relação entre resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas longitudinais em Lanzhou Loess, China (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003).....	50
Figura 39.	Exemplo de aplicação do software TEMP/W <sup>®</sup> (fonte:GEO-SLOPE®, 2010)...	51
Figura 40.	Análise TEMP/W em redor de um tubo de congelamento (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010).....	53
Figura 41.	Evolução de temperaturas em redor de um tubo de congelamento (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010) .....	54
Figura 42.	Valores característicos de condutividade térmica em função da temperatura da amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010).....	55
Figura 43.	Valores característicos de condutividade térmica em função do conteúdo de volume de água da amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010).....	56
Figura 44.	Valores característicos da capacidade térmica volumétrica em função do conteúdo de volume de água de uma amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010) .....	57
Figura 45.	Equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro .....	59
Figura 46.	Sistema de arrefecimento da Universidade de Aveiro .....	60
Figura 47.	Vista dos três reservatórios do sistema de congelamento da Universidade de Aveiro .....	60
Figura 48.	Esquema do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro (Fonte:BARBOSA et al., 2010) .....	60
Figura 49.	Tubos de congelamento em aço inox .....	61

Figura 50.	Curva Granulométrica .....	62
Figura 51.	Modelo simplificado para obtenção do coeficiente de permeabilidade (Fonte: CAVALCANTE, 2006) .....	69
Figura 52.	Intervalos de variação do coeficiente de permeabilidade (Fonte: adaptado de CAVALCANTE, 2006) .....	69
Figura 53.	Modelo prático para obtenção do coeficiente de permeabilidade - Carga constante (Fonte: CAVALCANTE, 2006).....	70
Figura 54.	Modelo prático para obtenção do coeficiente de permeabilidade - Carga variável (Fonte: CAVALCANTE, 2006) .....	71
Figura 55.	Colocação dos tubos de congelamento para a 1ª fase dos ensaios.....	72
Figura 56.	Esquema de colocação das sondas (termo - pares) no reservatório R1 .....	73
Figura 57.	Sonda utilizada para registo de temperaturas .....	73
Figura 58.	Congelamento de água (1ª fase) .....	73
Figura 59.	Planta do reservatório R1 - colocação de sondas e termo-pares .....	74
Figura 60.	Início do processo de congelamento da areia.....	75
Figura 61.	Pormenor do tubo de congelamento e areia congelada (1º dia).....	75
Figura 62.	Processo de congelamento - 10º dia.....	75
Figura 63.	Bolbo de congelamento de areia - Tubo 1 (15º dia) .....	76
Figura 64.	Bolbo de congelamento de areia - Tubo 2 (15º dia) .....	76
Figura 65.	Esquema do corte AA' do reservatório R1 .....	77
Figura 66.	Reservatório R1 - Corte AA' modelado no software (fonte: TEMP/W <sup>®</sup> ) .....	77
Figura 67.	Condições fronteira da modelação (fonte: TEMP/W <sup>®</sup> ).....	78
Figura 68.	Condições fronteira iniciais (fonte: TEMP/W <sup>®</sup> ) .....	79
Figura 69.	Condições fronteira finais (fonte: TEMP/W <sup>®</sup> ).....	79
Figura 70.	Situação inicial (0 dias) - modelação reservatório R1 com água.....	81
Figura 71.	Situação intermédia (8.8 dias) - modelação reservatório R1 com água .....	81
Figura 72.	Situação intermédia (22 dias) - modelação reservatório R1 com água .....	81
Figura 73.	Planta com o corte BB' representativo do reservatório R1.....	82
Figura 74.	Condições fronteira iniciais do congelamento de areia .....	83
Figura 75.	Condições fronteira finais do congelamento de areia .....	83
Figura 76.	Situação inicial (0 dias) - modelação reservatório R1 com areia .....	84
Figura 77.	Situação inicial (10 dias) - modelação reservatório R1 com areia .....	85
Figura 78.	Situação final (20 dias) - modelação reservatório R1 com areia.....	85
Figura 79.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 1 Cima .....	87
Figura 80.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 1 Fundo.....	88
Figura 81.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 2 Cima .....	89
Figura 82.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 2 Fundo.....	90
Figura 83.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 2 Cima .....	92
Figura 84.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 2 Fundo.....	93
Figura 85.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 3 Cima .....	94
Figura 86.	Gráfico modelo teórico <i>versus</i> dados reais - Sonda 3 Fundo.....	95



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1:	Efeitos na resistência de um solo congelado (Fonte:ARENSEN et al., 2007) ..	41
Tabela 2:	Pesagens iniciais da areia.....	62
Tabela 3:	Percentagens individuais em cada peneiro da análise granulométrica .....	62
Tabela 4:	Tabela da densidade da água e do factor $k'$ .....	65
Tabela 5:	Calibração dos picnómetros .....	65
Tabela 6:	Cálculo da massa volúmica das partículas .....	65
Tabela 7:	Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado .....	66
Tabela 8:	Cálculo da baridade do solo .....	67
Tabela 9:	Cálculo do teor em água .....	67
Tabela 10:	Resultados permeabilidade - Fórmula empírica de Hazen .....	71
Tabela 11:	Resultados permeabilidade - Permeâmetro carga constante.....	71
Tabela 12:	Resultados permeabilidade - Permeâmetro carga variável .....	71
Tabela 13:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 1 Cima .....	87
Tabela 14:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 1 Fundo ...	88
Tabela 15:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 2 Cima .....	89
Tabela 16:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 2 Fundo ...	90
Tabela 17:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 2 Cima.....	91
Tabela 18:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 2 Fundo...	92
Tabela 19:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 3 Cima.....	93
Tabela 20:	Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 3 Fundo...	94
Tabela 21:	Consumos registados e custos do processo de congelamento.....	95
Tabela 22:	Registo de temperaturas - 1ª fase - congelamento de água.....	111
Tabela 23:	Condutividade Térmica de alguns materiais (fonte: adaptado de GEO-SLOPE©, 2010) .....	113
Tabela 24:	Capacidade térmica volumétrica de alguns materiais (fonte: adaptado de GEO-SLOPE©, 2010) .....	114
Tabela 25:	Registo de temperaturas - 2ª fase - congelamento de areia .....	115





## SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
DCPMT	Driven Cone Pressuremeter
EDP	Energias de Portugal
MTS	Material Testing System
PBPMT	Preboring Pressuremeter
PCPMT	Pushed Cone Pressuremeter
PSPMT	Pushed Shelby Tube Pressuremeter
SBPMT	Selfboring Pressuremeter
D	Máxima dimensão do agregado
$d_{20}^{t_x}$	Densidade das partículas, à temperatura $t_x$ em relação à água destilada a 20°C
$E_p$	Módulo do pressiómetro
E	Módulo de Young
G	Módulo de rigidez
K	Condutividade térmica
$k'$	Quociente entre a densidade da água à temperatura $t_x$ e a densidade da água a 20°C
k	Permeabilidade
l	Litros
$\rho_b$	Baridade
P	Pressão
$P_4$	Pressão lida na calibração
R1	Reservatório 1
R2	Reservatório 2
R3	Reservatório 3
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\nu'$	Percentagem de vazios
$V_1$	Volume de referência de saturação e fugas

$V_0$	Volume inicial da sonda
$V_2$	Volume de perda
$V_3$	Volume lido ou registado
$V_4$	Volume lido na calibração da membrana
$w$	Teor em água
$\Delta P$	Variação de pressão
$\Delta V$	Variação de volume





# **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo introdutório é feita uma breve descrição do que será o trabalho propriamente dito. Apresenta-se a motivação para a sua realização, os seus objectivos, um breve enquadramento do problema, assim como a metodologia e estrutura adoptadas.

## **1.1. Motivação**

Pelo facto de hoje em dia se recorrer cada vez mais à técnica de congelamento solos pelo mundo fora, é de extrema importância estabelecer e desenvolver trabalhos laboratoriais que incentivem a exploração desta técnica, visando futuramente um melhor controlo e gestão dos recursos. Sabendo de antemão que este processo poderá conduzir a uma maior rentabilidade, em vários campos, nomeadamente no económico e na duração da obra, propõe-se a utilização do congelamento de solos, em alternativa aos recursos usados correntemente em construções, tais como contenções periféricas, escavações (em aquíferos ou não), estabilização de taludes, etc.

## **1.2. Enquadramento do problema**

As areias, sendo solos naturais, são materiais complexos e variáveis, consoante a sua génese. Apesar disso, e devido ao seu baixo custo, apresenta normalmente uma grande utilidade enquanto material de engenharia. No entanto é normal que este material nem sempre cumpra os requisitos necessários a determinadas aplicações. Nestes casos, é então necessário proceder a modificações/melhorias para que a areia (ou qualquer outro solo natural) obtenha as características necessárias, para uma melhor execução dos trabalhos.

Segundo CRISTELO (2001), a alteração dos parâmetros e propriedades de um determinado solo, para futura utilização como material de engenharia, é normalmente denominado por Estabilização de Solos.

No que respeita a processos de melhoramento de solos, podemos diferenciar três grandes grupos que são normalmente classificados em:

- Métodos de estabilização mecânica, onde se melhoram as características do solo através de uma melhor "arrumação" das suas partículas constituintes;
- Métodos de estabilização física, nos quais se alteram as propriedades do solo através de processos térmicos, da electricidade, etc.;
- Métodos de estabilização química, os quais modificam permanentemente as propriedades do solo através de aditivos;
- Métodos de estabilização hidráulica, proporcionando uma interacção no regime de fluxo da água intersticial presente no solo.

Todos estes processos/métodos residem na adopção de procedimentos que tendem a alterar características ou propriedades do maciço, de forma a adequá-los às solicitações impostas numa obra de engenharia, garantindo assim a sua estabilidade, diminuindo o custo do empreendimento e aumentando a segurança [LOUREIRO, 2008]. É precisamente no processo térmico que o âmbito desta dissertação se insere.

O tratamento térmico de um solo não pode ser entendido como um processo de melhoramento definitivo (pelo menos em países em que as temperaturas sejam amenas, tal como Portugal) do comportamento resistente do mesmo. Esta técnica, realizada durante a obra, serve de auxiliar, estabilizando temporariamente (durante o tempo necessário) o perfil geotécnico através da sua congelação, permitindo assim actuar com mais afinação no terreno de construção [PIRES, 2009].

Pode, assim, definir-se “congelamento de solos” como uma das várias técnicas utilizadas para melhoramento do solo, em que este é congelado artificialmente através de equipamentos de refrigeração, convertendo a água intersticial *in-situ* em gelo. Este passa então a ter uma função de cimento/cola, tornando assim as partículas do solo adjacentes ligadas entre si, aumentando a sua resistência mecânica, ficando a zona em que o congelamento foi efectuado/aplicado, com uma impermeabilidade bastante superior. [CONSTRUCTOR, 2010].

Esta dissertação pretende abordar a técnica de congelamento de solos, estudando o comportamento de areias congeladas, uma vez que é uma técnica praticamente inexistente em Portugal. Pretende-se estabelecer o conceito da técnica, enunciar alguns exemplos já utilizados fora do território Português e abordar o funcionamento do material utilizado, bem como os ensaios feitos neste tipo de matéria.

### **1.3. Objectivos**

Após um estudo prévio do conceito da técnica de congelamento de solos, pretende-se, através de ensaios laboratoriais, estudar diversos parâmetros geotécnicos de uma areia congelada, de entre os quais se destacam:

- Parâmetros mecânicos (parâmetros de resistência ao corte);
- Temperatura;
- Permeabilidade;
- Variações Volumétricas;
- Energia necessária no processo de congelamento.

Sendo o equipamento de congelamento utilizado instalado de raiz, serão feitos inicialmente ensaios apenas com água, os quais também servirão para discutir resultados e tentar recolher o máximo de informação acerca de todos os parâmetros envolvidos no processo. Caso seja necessário, também outros parâmetros serão abordados, para que o estudo global seja ainda mais aperfeiçoado, garantindo assim uma recolha de dados suficiente para um bom conhecimento da funcionalidade desta técnica.

Outro dos objectivos deste trabalho será também a realização de um modelo teórico através de um software de congelamento de solos, no qual seja possível posteriormente estudar qualquer tipo de material que tenha como finalidade ser congelado.

### **1.4. Metodologia/Estrutura do trabalho**

Os temas abordados no presente trabalho foram organizados em 9 capítulos:

- Capítulo 1 - Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução sobre os objectivos propostos no trabalho e também um breve enquadramento à temática da dissertação. Apresenta-se, ainda, a estrutura do trabalho, sendo igualmente referida a motivação para a realização do mesmo.
- Capítulo 2 - São descritos neste capítulo os diversos processos de congelamento de solos, os seus princípios de execução, apresentando de uma maneira global algumas características e propriedades atingidas com

o processo. São também apresentados diversos exemplos reais da aplicação, já realizados por intermédio desta técnica.

- Capítulo 3 - Apresenta-se outros tipos de técnicas/processos de melhoramento de solos, para que se possa ter uma breve noção do que se faz em alternativa ao processo de congelamento.
- Capítulo 4 - Neste capítulo são apresentados alguns ensaios experimentais que podem ser realizados em solos congelados, com vista no conhecimento das suas propriedades.
- Capítulo 5 - Analisa-se a importância de certos parâmetros e propriedades de solos congelados, onde investigações realizadas anteriormente são apresentadas e discutidas, com o objectivo de uma melhor percepção do comportamento de uma areia quando congelada.
- Capítulo 6 - É feita uma breve introdução ao software TEMP/W<sup>®</sup>, que posteriormente será utilizado na modelação de um reservatório de congelamento artificial do laboratório da Universidade de Aveiro.
- Capítulo 7 - Neste capítulo é apresentado o equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro, bem como as propriedades da areia que servirá para o caso de estudo da dissertação. É também feita a calibração do modelo através do software referido no capítulo 6, onde posteriormente são discutidos os resultados de todos os ensaios e os procedimentos realizados.
- Capítulo 8 - Finalmente no último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, dificuldades sentidas e propostas de desenvolvimentos futuros.



## 2. CONGELAMENTO DE SOLOS

O presente capítulo pretende expor as bases necessárias para que melhor se perceba o processo da técnica de congelamento de solos. São, portanto, apresentados os princípios básicos do procedimento, os materiais mais utilizados na técnica e os diversos exemplos de aplicações reais, que merecem o seu destaque para melhor intrusão na temática do documento.

### 2.1. Princípio do congelamento

Em muitas obras o solo não apresenta características suficientemente favoráveis para que as terras se mantenham estáveis durante o processo de construção. O congelamento de solos aparece como solução, fora de Portugal, nos países em que as temperaturas baixas predominam, onde a prática já se encontra numa fase bastante avançada e é utilizada tão frequentemente como outras técnicas com o mesmo propósito. Não deixa no entanto de ser utilizado em países com temperaturas amenas, sendo facilmente encontrados exemplos de aplicação em diversos países como por exemplo Angola.

O congelamento de solos beneficia, assim, das baixas temperaturas, situação em que a prática é feita por congelamento natural, ou, no caso contrário, onde as temperaturas não são suficientemente baixas, por congelamento artificial.

Esta técnica inovadora de estabilização de solos foi desenvolvida e utilizada na Alemanha em 1883, para a abertura de poços em solos de minas de carvão. Na actualidade, é uma das poucas que consegue criar uma barreira á prova de água com uma percentagem de impermeabilização perto dos 100%, e fornecer uma elevada capacidade de carga. Inevitavelmente, e sabendo "*à priori*" que o mundo da engenharia está envolvido num processo de recuperação contínuo do equilíbrio paisagístico, esta técnica assume o seu valor positivo no aspecto de ser extremamente benéfica ambientalmente, uma vez que apresenta soluções técnicas capazes de impor menor impacto/alteração na zona que se pretende estabilizar, não alterando praticamente a sua área circundante, surgindo portanto um aumento na sua procura, em diferentes tipos e locais de aplicação [SCHULTZ et al., 2008].

Segundo ALMEIDA (2003), os principais factores a ter em consideração na realização de congelamento de solos, e que condicionam o grau de congelamento artificial do terreno são:

- Tempo de congelamento e temperatura do terreno;
- Condições Geológicas e Hidrogeológicas da zona a tratar;
- Propriedades mecânicas, propriedades térmicas e quantidade de água no solo;
- Temperatura e velocidade de circulação da água;
- Condutividade térmica, propriedade que, em simultâneo com a capacidade calorífica do terreno, condiciona o grau de congelação do mesmo, varia em profundidade com as mudanças de solos e com a quantidade de água existente.

A tecnologia de congelamento faz uso das propriedades do solo que é artificialmente congelado. O método é seguro mas deve ser concebido com um certo detalhe. Para alcançar o objectivo pretendido, são enterrados no solo tubos de congelamento com diferentes espaçamentos. Após esta etapa, um refrigerante passa através dos tubos anteriormente descritos, os quais absorvem o calor do solo envolvente á medida que circula o refrigerante. O processo transforma assim a água intersticial *in-situ* em gelo.

Para a criação de um corpo/massa de solo congelado, é necessária uma linha de tubos horizontais, verticais ou inclinados, em que estes devem ser perfurados. Um tubo com a extremidade inferior aberta é inserido no centro do tubo de congelamento fechado (Figura 1). Neste tubo será introduzido o material de refrigeração, normalmente salmoura (água saturada em sal) ou azoto líquido. O refrigerante entra na tubulação interna e sai pelo tubo externo. Os tubos de congelamento podem ser organizados de maneira a alcançarem a forma ou feitio desejável, formando assim um muro de solo congelado [SCHULTZ et al., 2008].

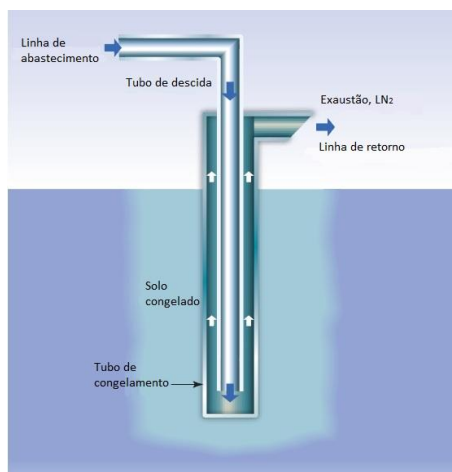


Figura 1. Representação base de um sistema de congelamento de solos (Fonte: adaptado de SCHULTZ et al., 2008)

### 2.1.1. Comportamento do solo congelado

O comportamento do solo congelado, quando carregado, é significativamente diferente de um solo não congelado, sendo que no primeiro caso o solo aumenta a sua resistência ao corte e a sua rigidez e diminuindo a sua permeabilidade em relação ao solo não congelado. Este tipo (estado) de solo está sujeito à fluência e a efeitos de relaxamento, sendo o seu comportamento bastante afectado pelas mudanças de temperatura. Em relação ao gelo, o seu comportamento visco-elástico está dependente de factores como a salinidade, pressão, taxa de deformação, orientação cristalina e densidade. Deste modo, qualquer caso de estudo tem de ser bem observado para se poderem considerar todos os parâmetros, tirando o máximo benefício da técnica.

A resistência à compressão uniaxial de um solo congelado é um valor bastante importante para o projecto estrutural, assim como o módulo de elasticidade ou de *Young* (E). Estes parâmetros não dependem única e exclusivamente do tempo de congelamento, mas também da temperatura. A tensão uniaxial de cedência em função da temperatura é apresentada na Figura 2, para diferentes tipos de solos e para o gelo puro. Na faixa de temperatura de interesse, o comportamento da tensão de rotura do solo é praticamente linear [SCHULTZ et al., 2008].

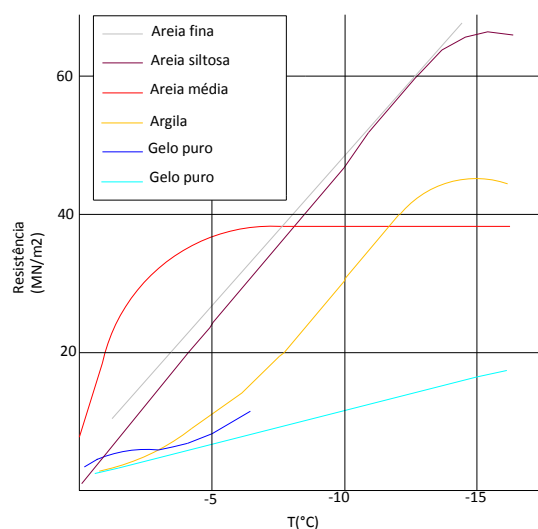


Figura 2. Gráfico Tensão Uniaxial *Versus* Temperatura (Fonte: adaptado de SCHULTZ et al., 2008)

A resistência ao corte, bem como os parâmetros de deformabilidade são bastante melhorados com o tratamento pelo congelamento. Porém, e mantendo constantes todas as características do solo, verifica-se que a forma de congelamento (temperatura final e velocidade de congelação) desempenha um relevante papel [IMPE, 1989]. KNUTSSON (1994), concluiu que o modo de congelação altera significativamente a resistência ao corte das areias, siltes e argilas, afectando os seus parâmetros, quando congeladas de forma unidimensional, (mantendo a base da caixa de corte a uma temperatura constante de  $-15^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de topo a  $+0.7^{\circ}\text{C}$ ), [HAMZAH, 1983]. Este efeito poderá estar relacionado com a orientação das escamas de gelo formadas durante o processo. Além disso, as areias e siltes saturadas congeladas tendem a apresentar valores de coesão e ângulo de atrito idênticos aos do gelo. No caso da argila, esta apresenta valores superiores [HAMZAH, 1983], [CRISTELO, 2001].

O fluxo das águas subterrâneas pode ter um impacto importante no sistema de congelamento. Este fluxo proporciona uma fonte contínua de calor e pode atrasar o processo de congelamento do solo, ou no pior caso, este pode alcançar um equilíbrio térmico em que o congelamento é interrompido/cessado. Como referência, as velocidades de fluxo efectivo (velocidade de escoamento) menores de 2 metros por dia no caso da utilização de salmoura, e de 4 a 6 metros por dia no caso do uso do azoto líquido, não têm qualquer efeito na parede/solo congelada. No caso de velocidades maiores que as anteriores, devem ser tomadas medidas adicionais nas condições do

projecto em particular, assegurando a rápida formação da zona de congelamento [SCHULTZ et al., 2008].

Os solos congelados possuem uma ductilidade muito reduzida, fracturando sob a acção de cargas permanentes. De salientar que os melhoramentos conseguidos com o congelamento são dependentes do tempo. Além disso, os parâmetros dependem da temperatura, o que significa que quer o tempo de congelamento, quer a temperatura devem ser considerados na avaliação das propriedades mecânicas nos solos congelados.

No que respeita ao cálculo da extensão da área de solo congelada junto ao tubo de congelação, segundo IMPE (1989), este pode ser efectuado tendo em consideração as condições de percolação *in situ*, o tipo de solo, a variação das propriedades térmicas do solo durante a redução da temperatura (condutibilidade e calor específico), a distância entre os tubos de congelação e a variação do nível freático durante o processo. Uma maneira de evitar a grande expansão do solo quando a água passa do estado líquido para o estado sólido, é incutir ao processo uma elevada velocidade de congelação, em que se não for assim o solo pode expandir mais de 9% em relação ao seu volume inicial [CRISTELO, 2001].

## **2.2. Refrigerantes usados no congelamento**

### **2.2.1. Salmoura**

No caso em que a salmoura é utilizada como refrigerante, é conectado um tubo à linha de abastecimento que faz a circulação do produto e um tubo exterior à linha de retorno. Este tipo de congelação requer um sistema de circulação fechado e o uso de unidades de refrigeração. A salmoura, geralmente uma solução saturada de água com sal tradicional, ou então cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), flui de volta através de um sistema múltiplo, antes de retornar para a unidade/tubo a congelar. Normalmente, e neste tipo de congelação, a salmoura atinge uma temperatura entre  $-20^\circ\text{C}$  e  $-37^\circ\text{C}$  [SCHULTZ et al., 2008].

Segundo a empresa Max-Boegl [BAYER et al., 2010], neste processo, a solução salina aquosa de cloreto de cálcio (salmoura) atinge temperaturas que variam entre  $-30^\circ\text{C}$  e  $-38^\circ\text{C}$ . Neste caso, bombas rotativas alimentam a solução de salmoura, através de condutas e tubos de congelamento isolados em circuito fechado, passando depois a

salmoura para o tubo de queda que se encontra dentro do tubo a congelar. De seguida, e depois de sair da extremidade do tubo de queda, o tubo de congelamento começa então o processo de congelamento do solo. Após este passo, a solução volta a sair para o tubo de retorno onde voltará a passar pela unidade de refrigeração. Neste processo a salmoura aquece cerca de 2 a 3°C em relação à unidade de alimentação. Existem no mercado unidades de congelamento especialmente projectadas para obras de congelamento de solos e têm capacidades de refrigeração que variam entre 100 e 500 kW. Estas unidades são completamente auto-suficientes e estão equipadas com todos os dispositivos auxiliares indispensáveis ao processo de congelamento de solos. Os tubos de congelamento usados nesta situação formam um circuito fechado, em que o refrigerante nunca entra em contacto com o solo ao qual se está a aplicar a técnica (Figura 3). As unidades de refrigeração são instaladas para remover o calor de compressão proveniente da unidade de congelamento. Consoante a situação e as condições do local, pode ser utilizada uma torre de arrefecimento, torre esta que funciona a água ou ar. Em alternativa o sistema pode ser arrefecido através de um rio ou caminho fluvial que se encontre perto do local, normalmente em obras de grande volume.

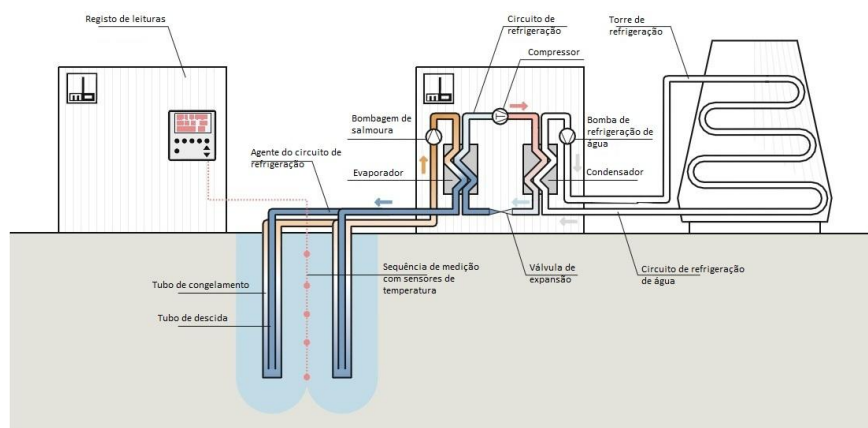


Figura 3. Esquema de congelamento por Salmoura (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010)

### 2.2.2. Nitrogénio ou Azoto Líquido

O nitrogénio é um gás não tóxico, não inflamável, que perfaz 78% do ar. Ao entrar em contacto com os tubos de congelamento que estão a uma temperatura superior ao azoto líquido, este evapora, saindo do tubo em forma de vapor. Esta evaporação absorve a energia do solo que está em redor do tubo, congelando o solo como resultado do

processo. Devido ao rápido processo, este tipo de congelamento é referenciado por “Congelamento de choque” pela empresa Max-Boegl [BAYER et al., 2010].

No caso da utilização de azoto ou nitrogénio líquido, é utilizado um tubo de escape para libertar os gases formados durante o processo (circuito aberto). O azoto líquido é fornecido através de um tanque de armazenamento no local ou directamente através de um camião de transporte (Figura 4). Este refrigerante atinge temperaturas de evaporação de  $-196^{\circ}\text{C}$  e pressões de 1 bar.

A quantidade de nitrogénio necessária para a congelação ou manutenção do gelo criado é determinada individualmente para cada tubo de congelamento por um circuito de controlo, o qual é constituído por uma válvula magnética e um sensor de temperatura. Estas válvulas são controladas através da monitorização da temperatura dos gases que são libertados pelo tubo de escape dos tubos de congelamento. Assim sendo, cada tubo pode ser gerido consoante as diferentes temperaturas de saída do gás. Dentro de uma central de medição e controlo, as temperaturas são observadas, registadas e processadas para uma respectiva avaliação dos resultados, tentando fornecer ao utilizador dados para que possa tirar o máximo rendimento e aproveitamento da máquina.

O congelamento por nitrogénio líquido é bastante mais rápido que o congelamento por salmoura, demorando apenas alguns dias no primeiro caso e algumas semanas no segundo [SCHULTZ et al., 2008]. Para além disso, o nitrogénio é libertado para a atmosfera na forma gasosa, sem causar danos graves ao ambiente. No caso de obras de grande escala e longos períodos de conclusão, o nitrogénio líquido é bastante mais económico que a salmoura, o que tem um peso económico bastante significativo no valor final do projecto [BAYER et al., 2010].

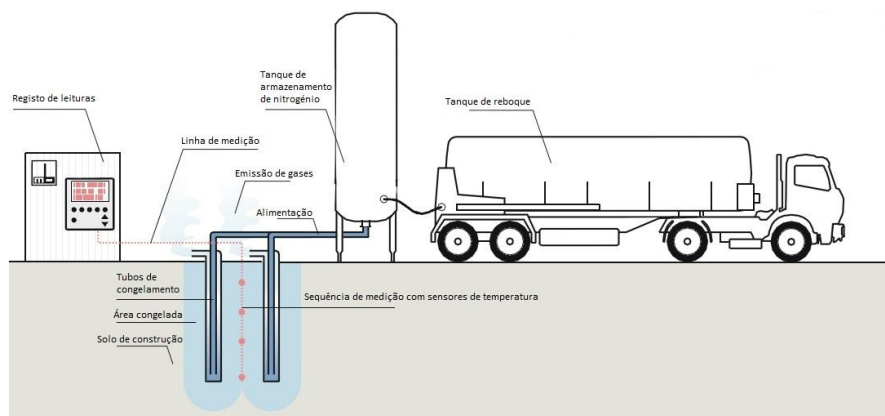


Figura 4. Esquema de uma linha de congelamento por Nitrogénio Líquido (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010)

### 2.3. Processo de execução

Assim sendo, pode-se facilmente estipular um procedimento geral para a execução da técnica de congelamento de solos, que será dividido nas seguintes etapas:

- Selecção do procedimento e do material de congelamento a utilizar, consoante o estudo geotécnico previamente realizado;
- Instalação do equipamento no terreno e ajuste dos tubos de refrigeração;
- Instalação de aparelhos que ajudem na monitorização e na determinação de alteração de parâmetros quer mecânicos, quer energéticos, ao longo do processo de congelamento;
- Realizado o congelamento da região afectada, procede-se à execução da intervenção, com o intuito pretendido;
- Após a finalização dos trabalhos de intervenção, os tubos de congelamento são extraídos, atingido o solo o seu estado inicial.

### 2.4. Campos de aplicação

Após a contextualização prévia sobre o congelamento de solos, é importante evidenciar o facto de que a técnica requer elevado nível de especialização e tem custos associados bastante elevados. No entanto, e segundo alguns autores, é um método bastante interessante, particularmente em grandes escavações e túneis.

As principais aplicações desta técnica são:

- Túneis;



- Realização de reforços, através de poços, atravessando camadas granulares sob o nível freático cujo esgotamento ou encerramento seria impossível de outro modo;
- Escavações temporárias, sob muros ou sapatas, que colapsariam ao não permitirem maior resistência ao terreno de apoio das mesmas na área de trabalho;
- Contenções Periféricas;
- Estabilização em superfície;
- Extração de amostras;
- Prevenção de contaminação de solos.

Podemos, assim, sintetizar, de uma forma mais prática as principais aplicações da técnica em contenções periféricas, escavações abaixo do nível freático, escavações extensas, escavações em poços profundos, escavações de túneis, cortinas de impermeabilização, estabilização de taludes e ainda no domínio ambiental.

#### 2.4.1. Exemplos reais de aplicações da técnica

##### 2.4.1.1. Metro de Fürth

Na cidade alemã de Fürth, a rede do metropolitano foi ampliada a partir de Stadthalle para a estação de Klinikum. No decorrer da construção do túnel, cerca de 2500 metros cúbicos de terra foram congelados directamente, sob uma fileira de casas situadas em Vacher Strabe. Com o intuito de apoiar o património histórico destes edifícios na entrada este do túnel, areia e cascalho do Quaternário tiveram que ser congelados com salmoura num comprimento de cerca de 60 metros.

Esses limites de congelamento foram gerados por tubos colocados em perfurações horizontais (Figura 5), apesar das pressões das águas subterrâneas serem um factor relevante na realização das mesmas, tentando-se ao máximo anular este efeito, que poderia causar o dano do material.



Figura 5. Congelamento do Túnel de Fürth (Fonte: BAYER et al., 2010)

A solução de salmoura, a uma temperatura de cerca de  $-38^{\circ}\text{C}$  foi bombeada ao longo de 1,4 km de comprimento, num sistema de tubulação fechado no solo. Decorridas cerca de 5 semanas, o solo em redor dos tubos apresentava-se congelado com cerca de 1,5 metros de espessura diametral relativamente ao tubo, permitindo assim que se pudessem continuar as escavações do túnel.

Este processo de congelamento do metro da cidade de Fürth foi inigualável em todo o mundo, uma vez que utilizou uma perfuração horizontal controlada, para a possível inserção dos tubos de congelamento [BAYER et al., 2010].

#### **2.4.1.2. Estação de metro de Brandenburger Tor U 55**

No centro de Berlim, nas imediações do Brandenburger, e rodeado por influentes embaixadas e pelo famoso hotel Adlon, está a ser construída a estação de metro, sob a protecção da técnica de congelamento de solos. Até à linha estar contínua até Alexanderplatz, a estação de Brandenburger Tor será a estação terminal da linha 55 U, iniciando-se na estação principal de Reichstag até à entrada de Brandenburger.

O projecto de construção será realizado mediante um documento de direcção do túnel principal, tal como as duas extensões em paralelo com o mesmo. Para proceder à colocação dos tubos de congelamento, 30 micro-túneis com um diâmetro de 1600 mm e um comprimento de 90 m, são dispostos em torno da secção de escavação (Figura 6). Devido ao preenchimento dos micro-túneis com argamassa, os tubos de congelamento são condutores de calor e integram-se no solo de uma maneira muito eficaz.

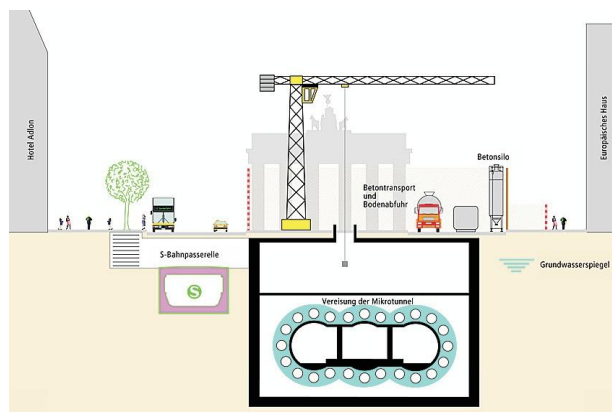


Figura 6. Esquema da concepção do túnel da estação de Brandenburger (Fonte: BAYER et al., 2010)

Para a operação de congelamento, será usado um total de quatro unidades de refrigeração em cascata, como se pode ver na Figura 7, com uma capacidade instalada de 1200 kW de refrigeração. O circuito com cerca de 90 metros cúbicos de salmoura é realizado a uma velocidade de vazão de cerca de  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . A temperatura da salmoura, na alimentação dos tubos de congelamento, será da ordem dos  $-38^\circ\text{C}$ .

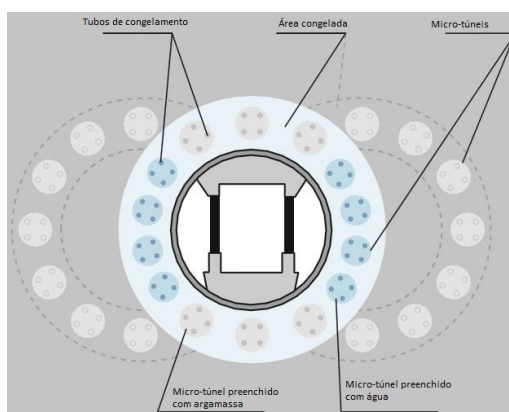


Figura 7. Corte esquematizado dos micro-túneis na estação terminal U 55 (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010)

Para uma optimização inovadora da construção, oito micro-túneis localizados na secção transversal da escavação são preenchidos com água. Durante a fase de manutenção e de encapsulamento do túnel central, esta água é integrada no sistema estático como gelo. Antes de o congelamento se dar nos micro-túneis laterais, os que estão preenchidos com água são aquecidos por um sistema de aquecimento, de forma a poderem ser retirados os tubos já existentes, sendo possível a escavação das partes laterais. Deste modo, as dificuldades durante o processo de remoção dos micro-túneis são evitados, bem como as vibrações envolvidas no processo construtivo.

Por outro lado, os moradores e residentes na área, por exemplo os do Hotel Adlon, ou mesmo da embaixada Húngara, não são perturbados pelas obras. Desta forma, existe grande pressão para que este processo de congelamento se desenvolva rapidamente num futuro bastante próximo [BAYER et al., 2010]]

#### 2.4.1.3. Museu da ilha, Berlim

A reconstrução e restauro do novo museu, situado na ilha dos museus, em Berlim, envolveram um trabalho subterrâneo de engenharia bastante complexo, o qual incluiu a construção de corredores de manutenção e a instalação no desenvolvimento dos trabalhos.

O desafio, durante a execução da obra, foi a tentativa de evitar que o edifício histórico tivesse assentamentos de elevadas dimensões, o qual foi originalmente construído usando fundações com estacas de madeira (Figura 8).

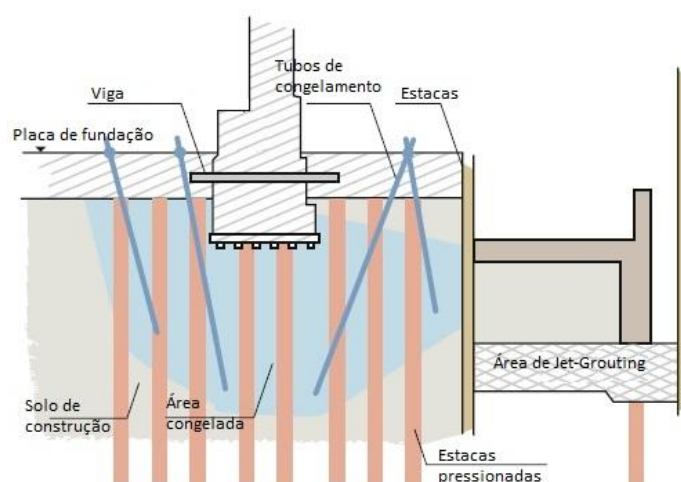


Figura 8. Esquema das fundações do Museu da ilha, Berlim (Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010)

Com a ajuda do congelamento por nitrogénio, foram criados vários corpos gelados, os quais suportariam as cargas sob essas fundações, já carentes face à sua idade. Também de maneira a criar uma escavação estanque para o poço do elevador, a área que circundava o piso e as laterais do poço foi submetida ao método de congelamento. Um total de 126 tubos de congelamento, com comprimentos variáveis entre 2 e 15 metros, foram dispostos no interior do edifício, ao longo da fachada sul e ao redor do poço do futuro elevador. Após a fase inicial de congelamento, alguns dos tubos tiveram que ser reduzidos no seu tamanho inicial, sendo recolocados sob a nova camada congelada perto

da laje. Ao todo, estes funcionaram durante 5 meses, assegurando assim a estabilidade e segurança do edifício. Este processo envolveu uma variação de temperaturas que variou entre os 15°C e os -70°C, o qual necessitou de cinco tanques diários de nitrogénio para que o processo corresse na perfeição. O sistema foi composto por cerca de 126 válvulas magnéticas, 265 sensores de temperatura e quatro sensores de oxigénio. Todo o processo foi monitorizado pela empresa Max Bögl [BAYER et al., 2010].

#### 2.4.1.4. Cais da Rússia

A escavação sob o “Cais da Rússia”, um complexo de edifícios históricos localizado em Boston, foi das primeiras aplicações da técnica de congelamento de solos nos Estados Unidos da América.

O túnel binocular, com cerca de 100 metros de comprimento, passa sob um conjunto vasto de fundações dos edifícios circundantes, feitas em madeira, com mais de 100 anos de idade (Figura 9).

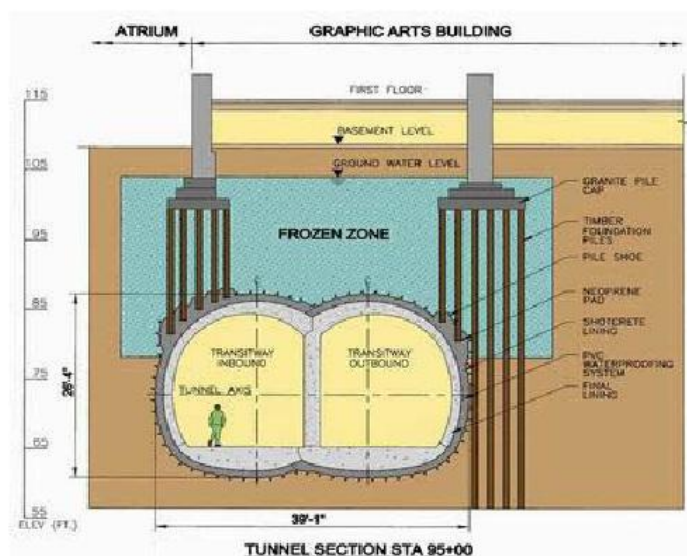


Figura 9. Seção transversal típica sob o “Cais da Rússia” (Fonte: KOCHEN, 2010)

As estacas são cortadas e incorporadas no revestimento do túnel, transformando a fundação numa sapata corrida, de maiores dimensões. Assim sendo, com a aplicação da técnica de congelamento de solos, o valor histórico do edifício foi preservado e as operações de escavação do túnel correram normalmente, sem quaisquer problemas de rotura [KOCHEN, 2010].

#### 2.4.1.5. Plataforma de extensão da estação de metro Marienplatz, Munique

Durante a expansão da estação do meio de transporte público mais movimentado no centro de Munique, na estação de metro de Marienplatz, dois túneis adicionais foram construídos, formando assim a nova plataforma subterrânea, duas vezes maior que o tamanho inicial. Desta forma os antigos túneis estão agora ligados aos novos, perfazendo um total de 22 passagens. O complexo processo de construção ocorreu sem que o metro tivesse que cessar as suas actividades e o desafio crucial foi o congelamento de um volume de areia situado abaixo do nível freático, localizado acima dos túneis da nova plataforma. Devido à localização da Câmara Municipal, por cima dos dois túneis, verificou-se que era impossível drenar os tubos com ajuda de extracção vertical por poços. Usando um escudo de ar comprimido, cerca de 100 metros de túnel foram conduzidos a partir de dois eixos verticais com cerca de 30 metros (Figura 10).

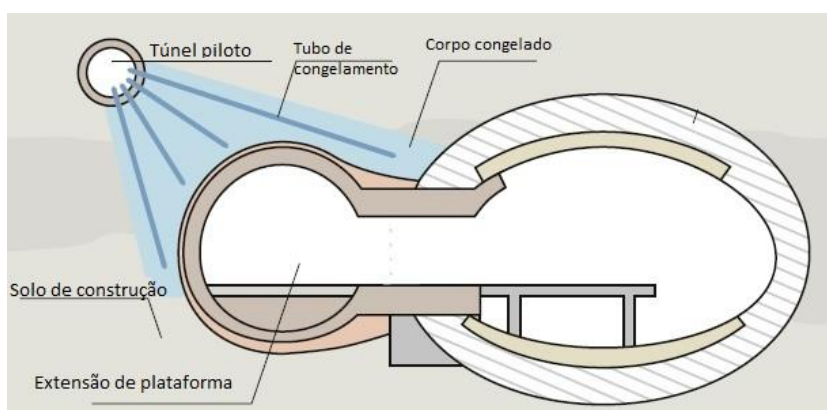


Figura 10. Esquema do projecto de expansão do metro de Marienplatz, Munique  
(Fonte: adaptado de BAYER et al., 2010)

O processo envolveu o congelamento com salmoura arrefecida a cerca de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Protegidos pelos blocos de gelo, os 100 metros de túnel foram construídos com reforço de betão projectado, de acordo com a norma de segurança nas minas. O uso da técnica de congelamento foi utilizada e executada apenas quando necessário, para atender às necessidades específicas durante a fase de construção, o que levou a um grau de deformação bastante baixo, não existindo problema na tolerância especificada pelo departamento de metro de Munique [BAYER et al., 2010].

#### 2.4.1.6. Centro histórico de Leipzig - Túnel Leipzig, Alemanha

O recém-construído túnel na cidade de Leipzig, na Alemanha, consiste em dois tubos fabricados através de um escudo hidráulico com forro segmentar. Este túnel atravessa o centro histórico da cidade, onde se destaca uma zona de importância acrescida, nomeadamente um complexo habitacional, composto por um edifício construído em 1908 e uma estrutura mais recente, construída em 1995, os quais estão separados por uma parede de estacas moldadas, que se cruza com o túnel. Para que o túnel pudesse continuar o seu percurso, parte da parede teve que ser removida (Figura 11). Para isso, um túnel auxiliar de cerca de 3,5 metros de diâmetro foi construído directamente sob os dois edifícios a partir de um eixo vertical.

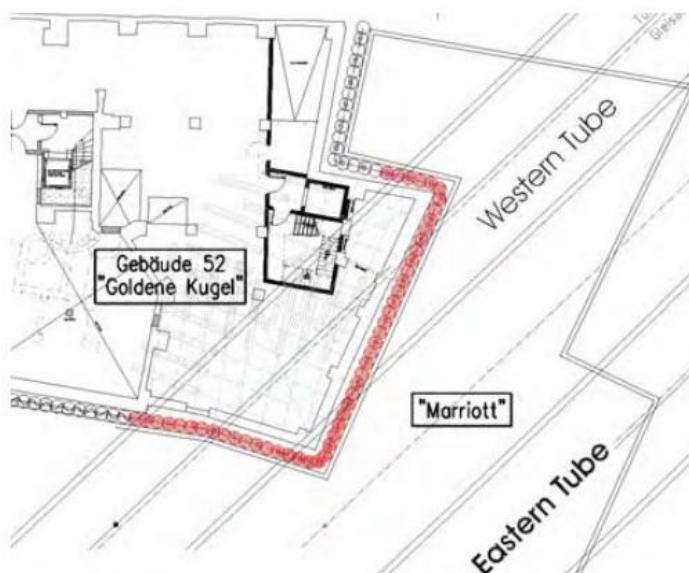


Figura 11. Planta com intersecção túnel - parede (vermelho: parede de estacas demolida) (Fonte: KIRSCH et al., 2009)

A escavação deste túnel, de 60 metros de comprimento, foi realizada pela técnica de mineração, tendo como suporte um bloco gélido de terreno de aproximadamente 5.000 m<sup>3</sup>. Devido às necessidades geométricas, o túnel onde se efectuou o congelamento foi construído em três etapas, incluindo duas cavernas de aproximadamente 7 metros de diâmetro para permitir eventuais mudanças de direcção. A perfuração necessária para a colocação dos tubos horizontais de congelamento foi iniciada a partir da zona norte da parede (1a). Cada fase termina numa secção alargada, permitindo assim executar as etapas seguintes, 1b e 2, respectivamente (Figura 12). O congelamento do solo foi feito por nitrogénio líquido que flui por um total de 120 tubos, instalados em furos ao longo de



35 metros abaixo do nível freático. Foram colocados 180 medidores de temperatura no solo para permitir um controle adequado da propagação do gelo. Os parâmetros de controle foram determinados para todos os medidores de temperatura, através de análise numérica e foram constantemente adaptados ao comportamento real do solo congelado [KIRSCH et al., 2009].

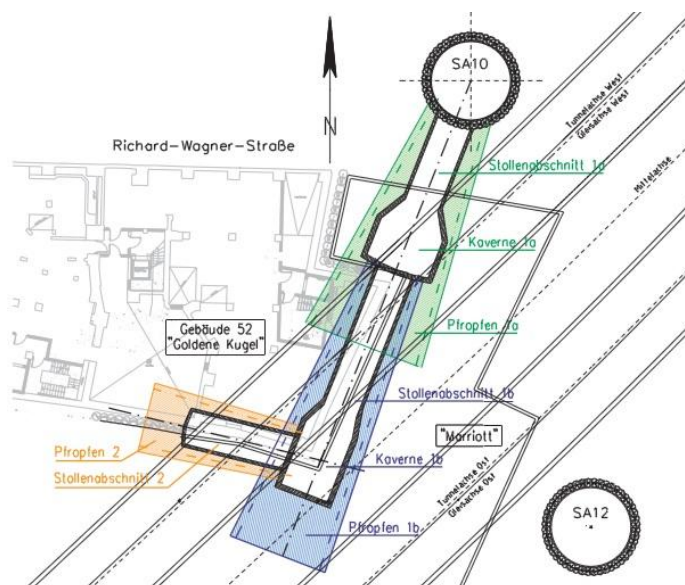


Figura 12. Esquema do congelamento em 3 fases - 1a;1b e 2 (Fonte:KIRSCH et al., 2009)



### 3. OUTROS MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A técnica de congelamento de solos surge como alternativa a métodos/técnicas já existentes no mundo da construção civil ao longo das décadas. Neste capítulo são apresentadas detalhadamente as mais correntemente utilizadas no nosso país. Assim, é possível ter uma noção daquilo que é feito, compreendendo melhor os benefícios da aplicação da técnica de congelamento.

#### 3.1. Introdução

No mercado da Engenharia, podem ser encontrados diversos métodos de melhoramento de solos, entre os quais a drenagem, a compactação com pré-carga (com ou sem drenos verticais), adição de elementos de estabilização, densificação profunda, injeção de caldas e reforço do solo com outros materiais, entre outros. A maior parte dessas técnicas, tais como a desidratação (drenagem), compactação de pré - consolidação e alguns tipos de injeção têm sido bastante utilizados nas últimas décadas. No entanto, as técnicas de estabilização de solos têm sofrido avanços significativos nas áreas de densificação profunda, tais como a vibro - compactação, uso de estacas profundas de compactação dinâmica, densificação através de explosivos, jactos de compactação e sistemas de colunas de brita.

Os diferentes métodos de estabilização de solos podem ser agrupados nas seguintes categorias [RAJU et al., 2008]:

- Estabilização por vibração profunda;
- Estabilização através do aumento das tensões efectivas;
- Estabilização por reforço;
- Estabilização por preenchimento estrutural;
- Estabilização através de misturas;
- Estabilização por Grouting;
- Estabilização térmica.

Um factor importante na escolha de um método adequado para estabilização de solos advém do facto de o local se encontrar com condições de acesso ou não. Quando a

melhoria do solo é necessária em grandes escalas e em locais abertos e sem qualquer tipo de desenvolvimento, o tratamento do solo fica desde logo menos dispendioso e com maior opção de escolha relativamente à técnica que irá ser utilizada. Já em casos opostos, em que as áreas de estudo são reduzidas ou em que existem restrições, como por exemplo estruturas já existentes, a escolha terá que ser feita tendo em conta outros factores. Existem portanto diversas alternativas práticas com o mesmo intuito, o de modificar as características do solo, melhorando assim os seus parâmetros mecânicos ou outros.

De seguida são apresentados, de forma sucinta, os principais métodos utilizados para estabilização de solos, sendo que cada um será mais apropriado a um tipo de solo em que seja mais favorável a sua utilização, quer em termos económicos, quer em termos de condições de solo existente.

### 3.1.1. Substituição do solo

A substituição do solo envolve a escavação do mesmo precisando de ser melhorado e substituído. O solo escavado pode, por vezes, ser recompactado até atingir um estado satisfatório, ou então, ser tratado com aditivos e de seguida ser substituído de forma controlada. Esta substituição deve ser feita tendo em conta a aplicação proposta, ficando o solo com as condições adequadas exigentes (ENSON et al., 1999).

### 3.1.2. Adição de elementos de estabilização

A adição de elementos de estabilização de um solo consiste na injeção ou mistura de aditivos, tais como cinzas volantes, cimento, cal ou bentonite, melhorando assim as propriedades do solo. Estes aditivos podem ser usados para aumentar a resistência, diminuir a permeabilidade ou melhorar a funcionalidade de um solo. O processo geral de estabilização de um solo, por adição de elementos de estabilização, consiste em (ENSON et al., 1999):

- Escavação e abertura do solo;
- Adição do estabilizador e água, se necessário;
- Agrupamento dos materiais;

- Compactação do solo permitindo a cura.

### 3.1.3. Compactação dinâmica

A compactação dinâmica é uma das mais económicas técnicas que se pode aplicar num solo. Esta técnica consiste na execução de repetidas pancadas, através da queda de pesos pesados na superfície do solo que se quer compactar. O peso pode variar de 6 a 25 toneladas e a altura de queda entre os 12 e os 20 metros (Figura 13). O constante impacto da massa de alta energia pode densificar as areias até uma profundidade de 8 metros. O grau de densificação do material é função da entrada de energia (ou seja, peso e altura de queda), bem como o nível de saturação, teor de finos e permeabilidade do material/solo. Este método não é indicado no caso de solos argilosos saturados (MACKIEWICZ et al., 2007).

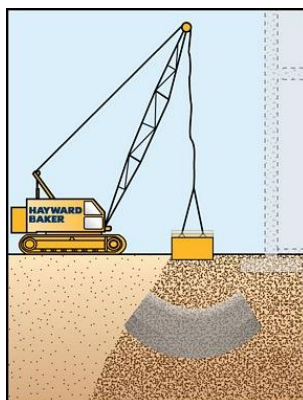


Figura 13. Exemplo esquemático de compactação dinâmica (fonte:KELLER, 2011)

### 3.1.4. Vibro - Compactação

O método de vibro - compactação tem como princípio o uso de sondas de vibração (geralmente com um diâmetro de 0,4 metros) para densificar o solo. A sonda é geralmente injectada no solo até uma profundidade desejada, sendo vibrada quando é retirada do mesmo, provocando um reagrupamento das partículas, densificando assim o solo (Figura14). A cavidade causada pelo repetido processo descrito anteriormente é depois preenchida com areia ou cascalho para formar uma coluna de solo, também densificada (ENSON et al., 1999).

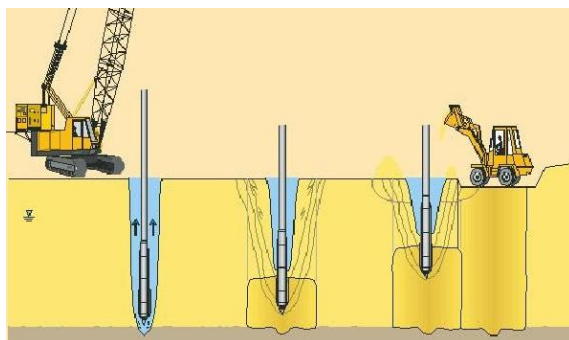


Figura 14. Sequência de instalação do processo de Vibro - Compactação  
(Fonte:KELLER, 2011)

#### **3.1.4.1. Aplicação da Vibro - Compactação**

A vibro - compactação é utilizada para aumentar a capacidade de carga de fundações e reduzir os seus assentamentos. Outra aplicação desta técnica é a densificação de areias para minimizar o potencial de liquefacção em zonas de terremotos. Pode ser utilizada como uma técnica de estabilização de solos capaz de suportar todo o tipo de estruturas, desde barragens até centrais de produção de agentes químicos. O uso da técnica depende principalmente do tipo de solo granular a ser compactado. Ao nível de profundidade, esta técnica consegue atingir os 65 metros, com resultados positivos.

No que toca às suas limitações, sabe-se que este método é mais eficaz em areias e cascalhos com percentagem de finos inferiores a 15-20 por cento [RAJU et al., 2008].

#### **3.1.5. Compactação através de explosivos**

Na compactação por explosivos, o reagrupamento das partículas ocorre depois de uma carga ser detonada (geralmente T.N.T. ou dinamite), a qual está colocada numa zona estratégica do solo. A detonação induz a liquefacção do solo, que depois compacta, atingindo propriedades mais estáveis. Este método pode ser aplicado a qualquer profundidade e é mais adequado para areias finas e areias siltosas com densidades relativas menores que 50% (ENSON et al., 1999).

#### **3.1.6. Vibro - Substituição**

Este método de compactação atinge o seu limite técnico quando a percentagem de finos num solo é elevada (superior a 20%), ou seja, as partículas são demasiado

pequenas para se conseguirem agrupar apenas com a vibração, sendo para isso necessário a introdução de um agente externo, um material de reforço, como por exemplo o cascalho ou pedras. O processo de vibro - substituição é iniciado com a abertura de um buraco no solo, o qual é preenchido com agregado mais grosso, como por exemplo o cascalho. De seguida o agregado é densificado, juntamente com o solo circundante, através da utilização repetida do vibrador em profundidade. Este processo produz uma coluna de pedra que posteriormente se torna parte integrante do solo circundante, como se pode ver na Figura 15. Existem vários tipos de instalação de sistemas de vibro - substituição, sendo cada um executado consoante o tipo de carga que irá carregar o solo, os seus parâmetros e as suas propriedades. As diferenças residem no tipo de auxiliar que é utilizado no furo, sendo em alguns casos água e noutros sem a presença desta [RAJU et al., 2008].

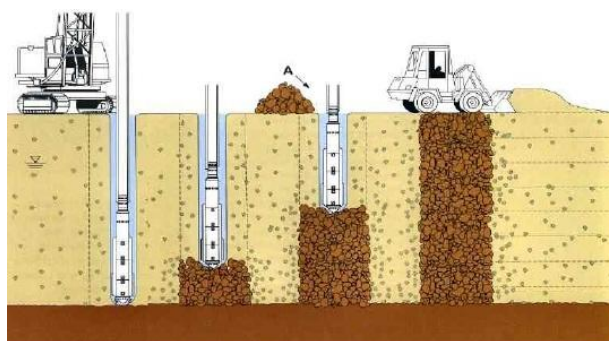


Figura 15. Sequência de instalação de um sistema de Vibro - Substituição  
(Fonte:KELLER, 2011)

### 3.1.7. Jet Grouting

O jet grouting é uma técnica de estabilização de solos realizada directamente no interior do solo sem escavação prévia, utilizando para tal um ou mais jactos horizontais de grande velocidade (cerca de 250 m/s), que aplicam a sua elevada energia cinética na desagregação da estrutura do terreno natural e na mistura de calda de cimento com as partículas de solo desagregado, originando um material com melhores características mecânicas do que o inicial e de menor permeabilidade [CARRETO, 2000].

### 3.1.7.1. Sistemas de Jet grouting

Através da evolução da técnica, o jet grouting desenvolveu-se em 4 tipos de sistemas diferentes, ilustrados na Figura 16, em que a escolha tem em conta não só as características do solo a melhorar, como também os prazos e objectivos da operação. Pode-se assim classificar o Jet grouting em [NEVES, 2010]:

- Jet simples (I);
- Jet duplo (II);
- Jet triplo (III);
- Super Jet (IV).

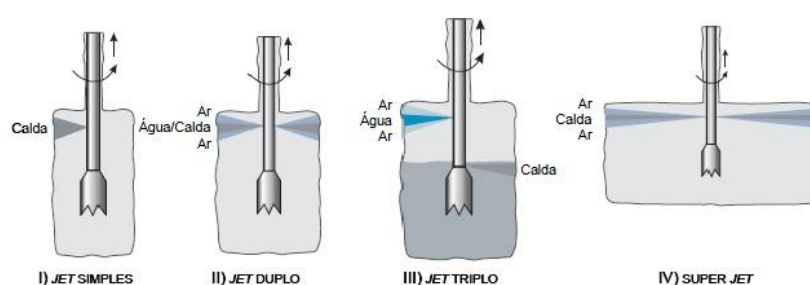


Figura 16. Diferentes tipos de Jet Grouting (Fonte: NEVES, 2010)

Dependendo do tipo de Jet utilizado/escolhido, é possível obter diferentes características de alguns parâmetros, tais como a pressão de injeção de calda, a pressão de injeção de ar e de água, velocidades de subida de calda e diâmetros espectáveis da coluna que se irá formar, assim como a sua resistência, entre outros.

### 3.1.8. Soil Mixing

O Soil Mixing é um modo de tratar solos, em profundidade, sem que para isso seja necessário recorrer a escavação ou cravação de elementos pré-fabricados, com o intuito de aumentar a sua capacidade de carga, impermeabilizar e promover o seu confinamento, fazendo com que o solo adquira novas características mecânicas. Esta técnica recorre a um ligante, geralmente o cimento, misturando-o com o solo, modificando as suas propriedades físicas e químicas (Figura 17).

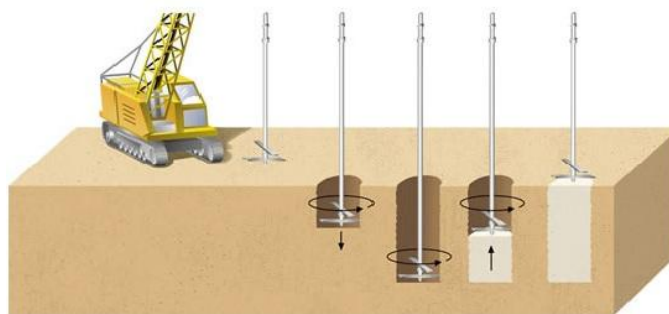


Figura 17. Esquema do processo geral Soil Mixing (Fonte: RAJU et al., 2008)

Este método pode ser denominado por "Jet Grouting mecânico", uma vez que o conceito é semelhante, diferindo no facto de não necessitar de elevadas pressões de injeção para o efeito da mistura. Define-se assim Soil Mixing pelas técnicas de mistura entre solo e ligante que envolvem processos mecânicos. Esta técnica apresenta duas variantes, a via húmida, "Wet Deep Mixing" e a via seca, "Dry Deep Mixing", sendo que no primeiro caso ocorre a adição de argamassa fluida, onde o ligante é previamente misturado com água, e no segundo caso, com adição de cimento seco, ou cal em pó, que utiliza o ar comprimido como meio de transporte [LOPES, 2010].

A tecnologia Soil Mixing pode ser aplicada numa ampla gama de tipos de solos fracos e problemáticos, tais como areias soltas, argilas marinhas moles, limos ultra macios, argilas siltosas fracas e lodos arenosos. As aplicações típicas incluem fundações de aterros com fins rodoviários, estabilização de taludes, escavações e fundações para estruturas. Além disso, pode também ser utilizada para aplicações de redução de vibração e na diminuição dos trajectos de percolação de água [RAJU et al., 2008].





## 4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

De uma maneira sintetizada, são de seguida expostos alguns dos ensaios que são executados em solos congelados, ou em solos em que as temperaturas habituais já são de ordem negativa. Neles são estudados os parâmetros característicos, numa tentativa de uma melhor percepção da alteração dos mesmos, quando sujeitos a temperaturas negativas.

### 4.1. Ensaio Triaxial

#### 4.1.1. Modelo MTS-810

Este ensaio é utilizado para o cálculo da deformação volumétrica e dos parâmetros mecânicos de um solo congelado. O equipamento consegue testar a variação de volumes, e suportar temperaturas até aos  $-30^{\circ}\text{C}$ , com pressões de confinamento de 0 a 24 Mpa. Com os resultados obtidos, pode-se avaliar a resistência à compressão dos provetes congelados e exprimir a sua influência na secção transversal média, conhecendo assim o comportamento do solo congelado.

O modelo MTS-810 (Figura 18) é constituído por três partes distintas, um equipamento de medição de volumes, uma célula triaxial e um sistema de refrigeração [ZHANG et al., 2007].

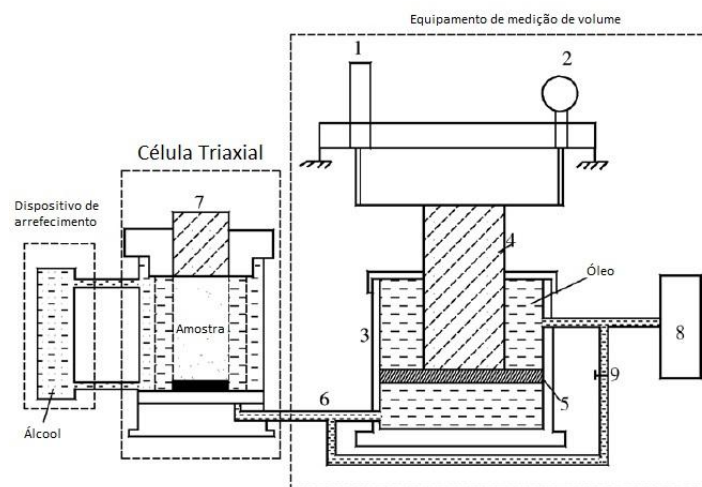


Figura 18. Ensaio Triaxial modelo MTS-810 (Fonte: adaptado de ZHANG et al., 2007)

#### 4.1.2. Modelo W3Z-200

Outro tipo de ensaio triaxial é feito com o modelo W3Z-200 (Figura19), através do qual se pode fazer o teste ao solo congelado sob uma variedade de carregamentos, permitindo fazer o ajuste para a pressão de confinamento e a compressão axial. É capaz de definir as condições de carregamento, tensão, tempo e temperatura, a qual varia entre -40°C e 20°C, com uma precisão de 0,1°C na câmara de ensaio [LIDONG-WEI et al., 2010].



Figura 19. Ensaio Triaxial modelo W3Z-200 (Fonte: LIDONG-WEI et al., 2010)

#### 4.2. Ensaio ao fluxo e permeabilidade ao ar

Este ensaio pretende medir o nível de infiltração do ar antes e após o congelamento do mesmo. Para isso utiliza uma câmara a baixas temperaturas, em que o ar se encontra a cerca de 4°C. Os testes são realizados no topo, no centro e na base do provete. O equipamento é constituído por uma válvula no topo, uma cápsula vedada onde a amostra de solo é colocada e uma fita de medição situada num tubo de plástico transparente (Figura 20). Feita a leitura inicial do volume de ar na amostra, a válvula do topo do equipamento vai deixando entrar mais ou menos ar e a variação de volume é assim medida na fita graduada [AL-HOURI et al., 2009].

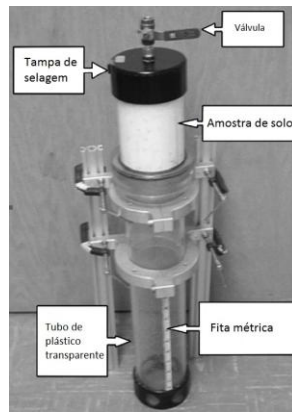


Figura 20. Ensaio à permeabilidade de um solo congelado (Fonte: adaptado de AL-HOURI et al., 2009)

#### 4.3. Ensaio de capacidade de suporte (CBR - Califórnia)

A análise da capacidade de suporte de um solo congelado pode ser facilmente avaliada num ensaio CBR, também denominado por ensaio Califórnia. Os provetes de solo congelado são colocados numa câmara congeladora, que englobam moldes próprios para o ensaio CBR, devidamente isolados com fibra de vidro (Figura 21). Através dos resultados do ensaio, pode-se facilmente fazer uma avaliação da resistência ao corte de um solo congelado, e estimar o seu desempenho *versus* temperatura [HAZIRBABA et al., 2010].

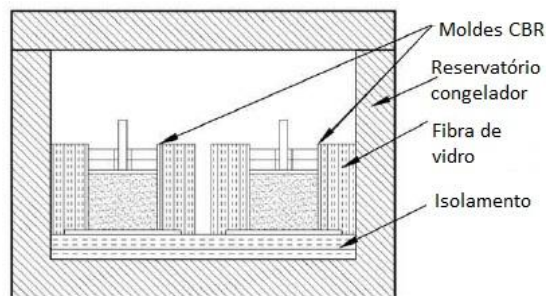


Figura 21. Ensaio de capacidade de suporte - CBR (Fonte: adaptado de HAZIRBABA et al., 2010)

#### 4.4. Ensaio de Pré-consolidação

A pressão de pré-consolidação é um parâmetro importante na mecânica dos solos. Para solos convencionais, à temperatura ambiente, este valor representará um historial da carga que nele actuou e tem uma relação próxima com as propriedades do solo. Da mesma maneira, este parâmetro pode existir em solos congelados, onde a interacção entre os grãos de gelo e os grãos do solo podem formar estruturas especiais.

Para fazer a medição deste valor característico dos solos utiliza-se um aparelho de carregamento (Figura 22), denominado de equipamento edométrico para solos congelados. O dispositivo é constituído por 3 partes distintas: sistema de controlo, sistema de carregamento e sistema térmico. O sistema de controlo consiste num sistema de aquisição e controlo da carga e da temperatura. O sistema de carregamento utiliza uma bomba servo-eléctrica para aplicar cargas no provete. Finalmente o sistema térmico pode ajustar a temperatura da tampa superior, da tampa inferior e também do ambiente circundante, de modo a que a amostra esteja termicamente uniforme [QI et al., 2010].

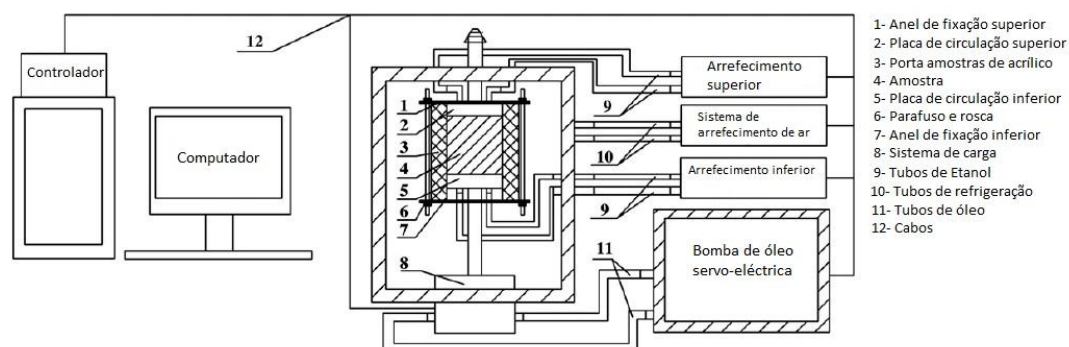


Figura 22. Ensaio de pré-consolidação (Fonte: adaptado de QI et al., 2010)

#### 4.5. Ensaio Pressiométrico

O ensaio pressiométrico é um ensaio relativamente recente, cujo desenvolvimento e aplicação prática se iniciou em 1957 por Louis Menard, em França.

O ensaio consiste em fazer expandir uma membrana flexível cilíndrica, contra o solo ou rocha branda, medindo-se a evolução das forças aplicadas e as correspondentes deformações radiais. Este ensaio é realizado no interior de um furo de sondagem com diâmetro idêntico ao da sonda pressiométrica (Figura 23). Através da sua execução, é possível determinar os parâmetros relacionados com o estado de tensão *in situ* (resistência e deformabilidade), a partir de uma lei de comportamento comparada à expansão de uma cavidade cilíndrica de comprimento infinito, situada em meio isotrópico e homogéneo, sujeito a um estado de tensão uniforme [FELIZARDO, 2008].

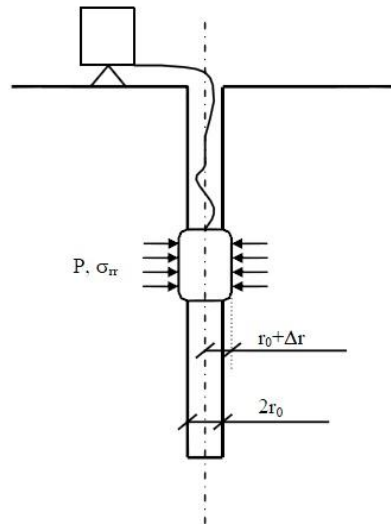


Figura 23. Esquema geral de um pressiómetro (Fonte: SILVA, 2001)

Existem diferentes tipos de pressiómetros no mercado, sendo a principal diferença entre eles fruto do processo de introdução da sonda no solo. Podemos distinguir os diferentes pressiómetros nas seguintes categorias:

- Com pré - furação (PBPM - Preboring Pressuremeter);
- Com auto - perfuração (SBPM - Selfboring Pressuremeter);
- Com cone, cravado no local (DCPM - Driven Cone Pressuremeter);
- Com cone, penetração por pressão (PCPM - Pushed Cone Pressuremeter);
- Com tubo exterior de revestimento, penetração por pressão (PSPM - Pushed Shelby Tube Pressuremeter).

Estes ensaios podem ser realizados com sucesso a qualquer profundidade, sendo o volume do solo solicitado extremamente importante para os resultados finais [SILVA, 2001]. Relativamente aos pressiómetros do tipo PBPM, podemos distinguir subcategorias associadas a este grupo, sendo que na parte experimental será utilizado o pressiómetro de Ménard (o qual se engloba neste grupo), cujo processo de funcionamento será descrito, detalhadamente, na parte laboratorial dos ensaios.

#### 4.5.1. Determinação de parâmetros mecânicos

##### 4.5.1.1. Rectificação das leituras de pressão e volume

Devido à retenção da membrana da sonda e à expansão do próprio equipamento, as leituras de volume e pressão efectuadas nos medidores não apresentam os valores reais originados pelo peso volúmico do solo na zona do furo de ensaio. Deste modo, as leituras de pressão e volume devem ser corrigidas de modo a obter os valores reais que actuam sobre a parede do furo onde se colocará o pressiómetro. A pressão corrigida é calculada por:

$$P = P_r + P_1 - P_i \quad (4.1)$$

em que  $P$  denota a pressão corrigida, onde  $P_r$ ,  $P_1$  e  $P_i$  representam os valores de leitura de pressão, as pressões estáticas do líquido e a pressão da membrana de retenção, respectivamente. Além disso, a pressão estática do líquido  $P_1$  é calculado através da seguinte fórmula:

$$P_1 = 10(h + Z)\rho_1 \quad (4.2)$$

onde  $h$  representa a altura do pressiómetro,  $Z$  a distância do ponto médio da sonda até ao solo e  $\rho_1$  a densidade do líquido. A pressão da membrana de retenção,  $P_i$ , é determinada pela pressão de calibração da sonda. O volume corrigido é calculado através da fórmula:

$$V = V_r - V_i \quad (4.3)$$

em que  $V_r$  e  $V_i$  representam os valores de leitura e os valores de perdas, respectivamente. O valor de  $V_i$  é determinado pelos resultados da calibração da sonda. Utilizando o valor da pressão corrigida,  $P$ , e do volume corrigido,  $V$ , é possível construir um gráfico com uma curva  $P - V$  (Figura 24). A partir desta curva podem ser deduzidos três parâmetros mecânicos, característicos de solos congelados,  $P_0$ ,  $P_f$  e  $P_1$ .  $P_0$  traduz a pressão horizontal inicial do solo congelado,  $P_f$  representa a pressão crítica plástica e  $P_1$  a carga limite.

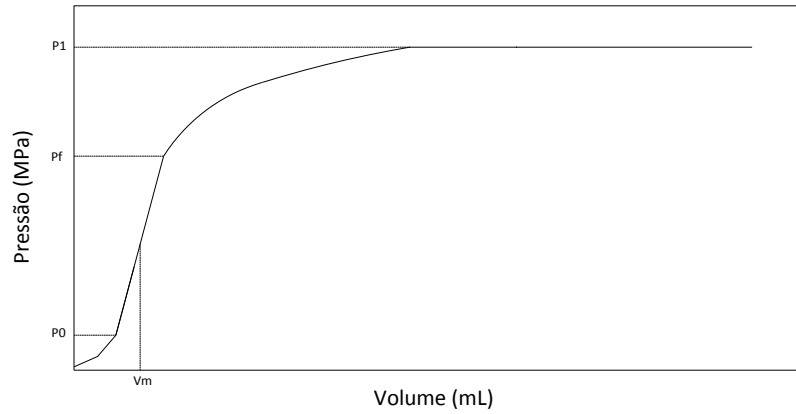


Figura 24. Diagrama para determinação de parâmetros mecânicos (Fonte: adaptado de YU et al., 2002)

A curva típica de teste é semelhante à curva de carga estática de ensaio [YU et al., 2000]. É constituída por três partes: a fase inicial pressurizada, cuja inclinação é gradual, a qual é menor do que a fase elástica similar, que também é denominada de fase da linha recta, com uma inclinação de curva abrupta. A última é a fase plástica. Nesta fase, o solo começa a ceder e a falhar gradualmente [YU et al., 2002].

#### 4.5.1.2. Determinação do módulo do pressiómetro e do módulo de rigidez

De acordo com a teoria da elasticidade e da equação de expansão radial de Lamé, existem três equações importantes:

$$G = V_1 \times \Delta P / \Delta V \quad (4.4)$$

$$G = \frac{E_p}{2(1 + \nu)} \quad (4.5)$$

$$V_1 = V_p + V_m \quad (4.6)$$

Através das equações anteriores, podemos obter facilmente a equação para o cálculo do módulo do pressiómetro, dada pela expressão seguinte:

$$E_p = 2(1 + \nu) \times (V_p + V_m) \times \Delta P / \Delta V \quad (4.7)$$

onde  $\Delta P$  e  $\Delta V$  representam a variação de pressão e volume entre a parte do gráfico correspondente à linha recta, respectivamente.  $\nu$  corresponde ao coeficiente de Poisson,  $V_p$  é o volume inicial da sonda e  $V_m$  é o volume indicado pelo ponto médio da fase da linha recta [YU et al., 2002].





## 5. PARÂMETROS E PROPRIEDADES DE SOLOS CONGELADOS

O comportamento reológico de solos congelados depende de uma série de factores, sendo um tema bastante complexo. A carga e alterações de temperatura, assim como a composição real do solo congelado são apenas alguns dos aspectos que devem ser considerados quando se analisa a resposta mecânica de um solo deste tipo. Recentes avanços, tanto em métodos de mediação para exames laboratoriais, como novos modelos teóricos, têm ajudado quer no conhecimento e desenvolvimento e conhecimento dos processos termo - mecânicos quer na resposta dos solos congelados a diferentes perturbações. O presente capítulo resume os trabalhos já efectuados, e também o actual ponto de situação no âmbito da investigação de parâmetros e propriedades de solos congelados.

A investigação sobre as propriedades físicas dos solos congelados começou no século XIX e dois acontecimentos foram responsáveis para esses estudos. A revolução industrial expandiu-se para áreas mais remotas do hemisfério Norte, e o solo artificialmente congelado foi introduzido como um dos métodos para a construção de estruturas de apoio temporário utilizadas em minas e engenharia geotécnica [ARENSEN et al., 2007].

Neste capítulo são apresentados diversos testes/ensaio já realizados, cuja análise nos permite conhecer melhor o comportamento de solos sujeitos a congelamento, nomeadamente no que respeita a parâmetros mecânicos e suas propriedades.

### 5.1. Parâmetros Mecânicos

O comportamento tensão - deformação em solos congelados é semelhante ao comportamento do gelo, apresentando quatro respostas diferentes (Figura 25), que dependem das taxas de deformação aplicada:

- a) Comportamento dúctil com endurecimento (ductile behavior with strain hardening);
- b) Comportamento dilatante com tensão de amolecimento;

- c) Comportamento frágil com rotura frágil, logo após o ponto de deformação plástica;
- d) Rotura frágil.

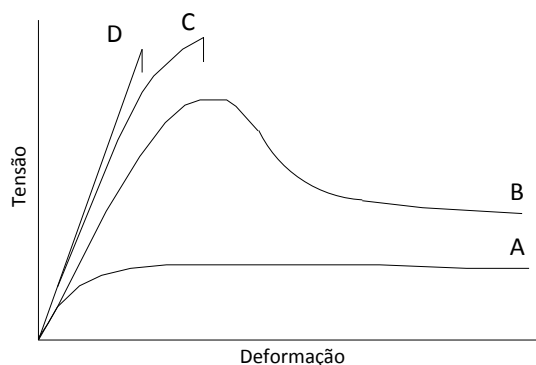


Figura 25. Comportamento Tensão *versus* Deformação em solos congelados (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2007)

Testes recentes em solos ricos em gelo, tais como amostras de solos congelados naturalmente e solos congelados artificialmente comprovam este comportamento. Apesar disso, as partículas sólidas do solo influenciam a resposta à tensão - deformação de um solo congelado que não é apenas função da taxa de deformação aplicada, mas também depende do teor volumétrico do gelo (Figura 26). No entanto, o comportamento frágil pode ocorrer em solos bastante compactados, que não se encontram congelados. A diferença entre o comportamento dilatante e dúctil, é geralmente apresentada como uma função da densidade do solo, ou seja, através do índice de vazios. Investigações adicionais do comportamento tensão - deformação dos solos congelados mostram um patamar inicial do diagrama apresentando um pico de resistência para pequenas deformações [ARENSON et al., 2007].

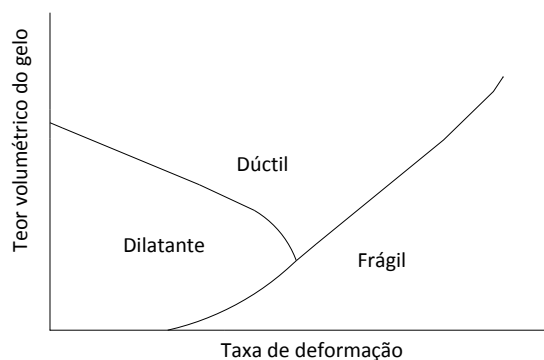


Figura 26. Comportamento de um solo - Teor volumétrico do gelo *versus* Taxa de deformação (Fonte: adaptado de ARENSON et al., 2007)

### 5.1.1. Resistência ao Corte

A maioria dos testes efectuados em solos congelados relata informações sobre a resistência à compressão dos mesmos, não existindo muita informação disponível acerca de testes efectuados com o intuito de analisar/perceber melhor o funcionamento de um solo congelado quando sujeito a tensões de corte.

Em 1985 [CHAMBERLAIN et al., 1985], testes efectuados em solos salinos conseguiram caracterizar algumas relações entre a resistência ao corte e a temperatura, bem como com outros factores. Foram efectuados alguns testes, nomeadamente em argila e lodo, onde uma força normal de 60 kPa foi aplicada. A Figura 27 mostra alguns resultados da relação resistência ao corte contra deformação do provete. Pode-se constatar que a temperaturas mais baixas, os picos de resistência estão bem definidos, notando-se também que até um dado valor de deformação horizontal a resistência ao corte aumenta, atingindo um máximo, diminuindo depois o seu valor com o continuo aumento da deformação horizontal.

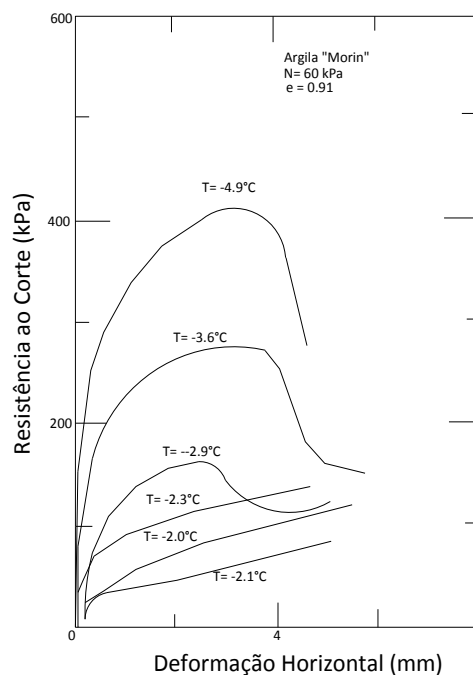


Figura 27. Exemplo de curvas tensão de corte *versus* deformação horizontal (Fonte: adaptado de CHAMBERLAIN et al., 1985)

Também em 1964 [WOLFE et al., 1964], testes realizados no mesmo tipo de solos conduziram às mesmas conclusões que as anteriores. A resistência ao corte de solos

deste tipo aumenta com a diminuição da temperatura, tendo obviamente picos diferentes de tensões máximas, mantendo no entanto a tendência dos resultados, como se pode ver na Figura 28.

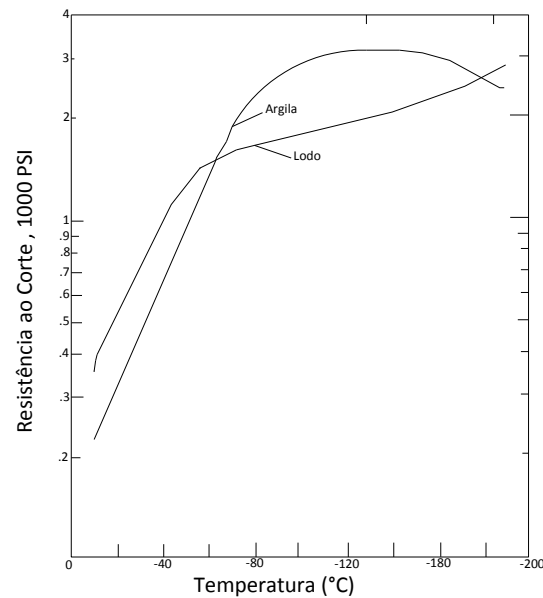


Figura 28. Resistência ao corte *versus* temperatura (Fonte: adaptado de WOLFE et al., 1964)

#### 5.1.2. Variação dos parâmetros mecânicos de solos congelados com diversos parâmetros

De seguida apresenta-se um quadro resumo sobre alguns parâmetros que podem influenciar a resistência de um solo congelado, de uma forma geral, bem como a sua influência e efeitos sobre este.

Tabela 1: Efeitos na resistência de um solo congelado (Fonte:ARENSEN et al., 2007)

<i>Variável</i>	<i>Efeitos na resistência de um solo congelado</i>
Temperatura	Geralmente a resistência aumenta com a diminuição da temperatura. Além disso, o comportamento tensão - deformação pode alterar o seu estado, de dúctil para frágil. Esta mudança deve-se principalmente à alteração no teor em água não congelada.
Taxa de deformação	Um aumento na taxa de deformação resulta num aumento da resistência e também numa mudança em relação ao comportamento frágil.
Conteúdo de gelo	A resistência aumenta à medida que o conteúdo de gelo diminui. Isto acontece devido aos obstáculos estruturais existentes, como resultado da formação de partículas sólidas que entram em contacto entre si.
Conteúdo de ar	Apenas alguns testes sobre o efeito do conteúdo de ar na resistência em solos congelados estão disponíveis. Os resultados sugerem que o ar dentro das amostras anula qualquer tendência para a ocorrência de dilatação, proporcionando uma oportunidade significativa para a eliminação dos vazios de ar e da contracção associada.
Tensão Confinada	A tensão confinada tem um efeito menos significativo na resistência de um solo congelado, submetido a tensões inferiores às pressões de fusão. Quanto maior for a existência de partículas sólidas, maior será a resistência pronunciada, isto porque a componente de resistência, devido ao trabalho provocado pela dissipação de atrito, é função da tensão confinada.
Salinidade	A resistência de um solo salino congelado diminui com o aumento da salinidade. Isto deve-se ao facto do ponto de congelamento baixar, resultando num maior teor de água não congelada, a temperaturas semelhantes. Além disso, sabe-se que a estrutura de cristais de gelo num ambiente salino fluido é mais frágil, o que pode ser uma causa adicional para a diminuição da resistência de solos salinos, comparando com solos não salinos.

## 5.2. Condutividade Térmica e Salinidade

O processo de congelamento nos solos é bastante complexo. Dependendo do gradiente térmico aplicado, tamanho das partículas ou salinidade, os comportamentos obtidos serão diferentes. A condutividade térmica dos componentes do solo pode no entanto, ser considerada o factor chave para o processo de congelamento. Temos que distinguir dois processos fundamentais [ARENSEN et al., 2004]:

- Avanço das temperaturas baixas através do esqueleto do solo;
- Avanço das baixas temperaturas através da matriz de gelo existente nos poros.

### 5.2.1. Mecanismo de congelamento de areias

Numa areia com composição mais grossa, as temperaturas baixas avançam mais rapidamente através do esqueleto do solo, uma vez que a condutividade térmica do material é superior. O gelo irá "crescer" de acordo com o local do gradiente térmico, ou seja, irá começar a aparecer a partir das partículas do solo, que têm maior gradiente. Poderá acontecer também que alguma água fique retida no interior dos espaços vazios formados pelas partículas, normalmente quando o gradiente térmico é bastante elevado. Nos casos em que é baixo, o congelamento dá-se mais lentamente, não originando tantos espaços vazios não congelados (Figura 29).

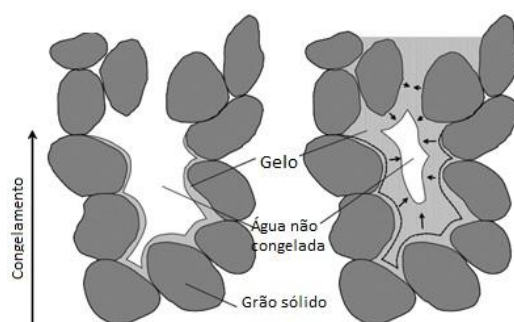


Figura 29. Processo de congelamento de uma areia (Fonte: adaptado de ARENSEN et al., 2004)

Os mecanismos de congelamento mudam significativamente nos solos salinos. Mesmo com salinidades baixas, o gelo começa a formar-se em forma de agulhas, que empurra a salmoura com concentração elevada, para os lados. Uma vez que a condutividade térmica do gelo é superior à condutividade da salmoura, e a concentração

de sal na ponta é inferior à situada no meio dos cristais de gelo, o gelo continua a crescer na ponta das agulhas (Figura 30) [ARENSEN et al., 2004].

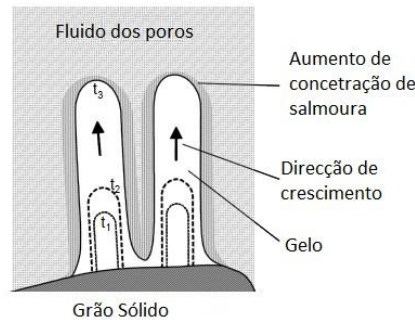


Figura 30. Formação de agulhas no processo de congelamento (Fonte: adaptado de ARENSEN et al., 2004)

### 5.3. Volume de Água Não Congelada

A água não congelada desempenha um papel muito importante sobre a resistência medida de um solo congelado. A quantidade de água não congelada pode ser significativa, mesmo a temperaturas abaixo de 0 °C. A água pode apresentar-se como uma fina camada absorvida ao redor das partículas finas, ou como água livre, nos poros. Quanto menores forem as partículas, maior será o volume de água não congelada. Sendo uma substância incompressível, a água pode transferir tensões positivas e negativas, ou sucção, entre as partículas do solo e os cristais de gelo. Estudos recentes mostram que uma estrutura de gelo é mais frágil em solos salinos e a localização da água não congelada depende do início de congelamento da amostra inicial [ARENSEN et al., 2007]

### 5.4. Variações de parâmetros mecânicos em solos congelados artificialmente - caso de estudo 1

O congelamento artificial de um solo é uma técnica usada para melhorar a resistência do solo temporariamente, sob o ponto de vista da engenharia geotécnica. A força real e a deformação característica da estrutura do solo congelado dependem da temperatura aplicada, do regime de congelamento, da química dos poros da água e do tamanho dos grãos do solo que é congelado. Durante o congelamento através de tubos verticais, a dinâmica da formação de gelo e a frente de congelamento aumentam radialmente, resultando numa variação significativa no comportamento mecânico da

massa congelada. Temperatura, teor em água não congelada e salinidade variam também radialmente dentro do corpo congelado.

Seguidamente são apresentados os resultados de uma investigação laboratorial sobre a variação das propriedades de resistência de uma zona congelada em torno do tubo, onde a areia é fina, com uma salinidade de água nos poros de cerca de 13 g/L, num tanque com cerca de 1,5 metros de diâmetro e 1 metro de altura. Temperatura, salinidade e água não congelada foram medidos em locais diferentes, em função do tempo e da massa congelada. Após o congelamento estar completo, foram obtidas amostras do núcleo da areia, onde foram medidas forças de compressão em que a temperatura é igual à registada no final do congelamento. Estes dados servem para uma melhor percepção e conhecimento das características da resistência e deformação da areia congelada em função do tempo e da zona que é congelada, formando assim uma base de dados que fornece relações entre força e os factores que a influenciam num solo estabilizado por este processo [NGUYEN et al., 2006].

#### **5.4.1.1. Resistência à Compressão (não confinada) vs Distribuição de Salinidade vs Volume de Água Não Congelada**

A distribuição de temperatura após três e quatro semanas do início do congelamento é demonstrada na Figura 31. As posições A, B, C, D e E representam, respectivamente, pontos de medição que vão ficando mais distantes em relação ao centro do tanque, que coincide com a posição A, aumentando assim a distância com a sequência da letra.



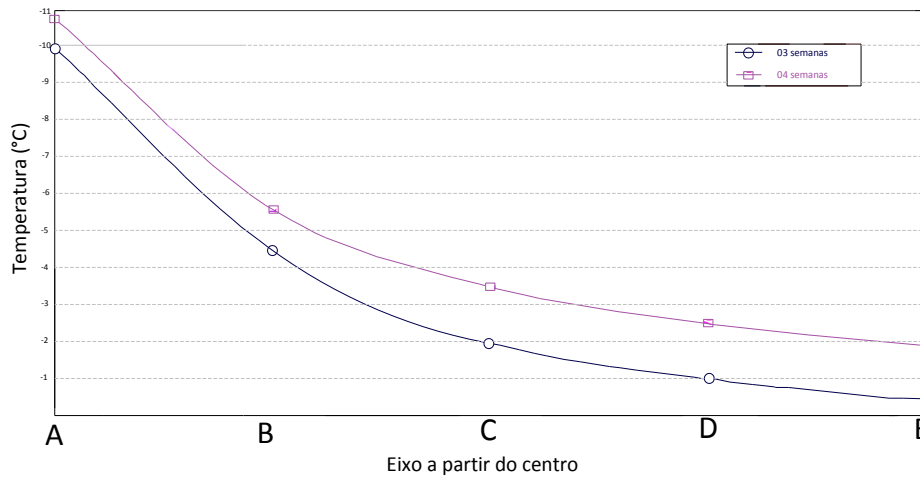


Figura 31. Distribuição de temperaturas ao longo de 3 e 4 semanas (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006)

A Figura 32 representa os registros da resistência à compressão não confinada (temperaturas da 4ª semana). Estes resultados são comparados com testes realizados anteriormente (MAHAR et al., 1985), para uma areia congelada com salinidade semelhante. Nesta experiência os resultados mostram um aumento significativo na resistência, em relação à anteriormente realizada, nomeadamente na zona em que a taxa de congelamento começa a ser baixa (zona C). Esta baixa taxa de congelamento, de menos de 0,3 °C/dia, faz com que a salinidade seja rejeitada. Em consequência, a força é maior para uma dada temperatura. Por outro lado, os valores de resistência mais reduzidos foram registados na zona de grande salinidade, ou seja no fundo do tanque na zona E.

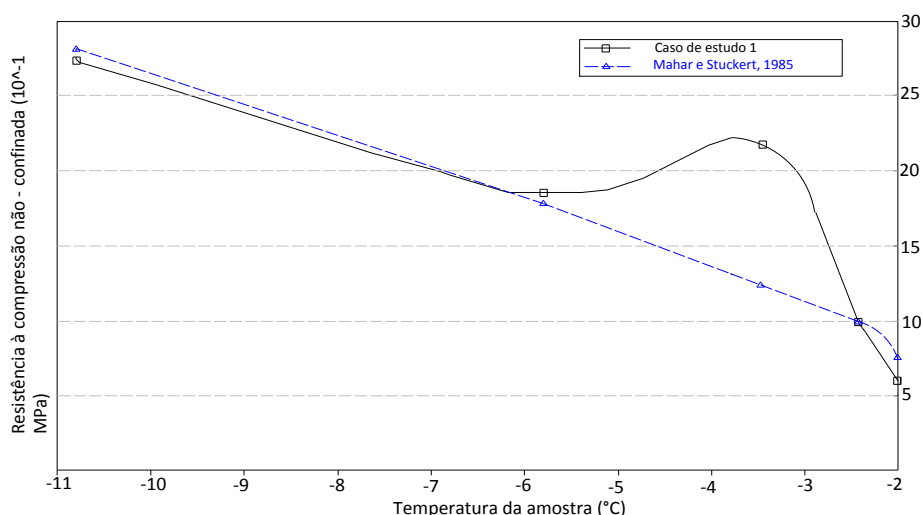


Figura 32. Resistência à compressão não - confinada *versus* temperatura (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006)

A distribuição do conteúdo de água não congelada ao longo do eixo radial é apresentada na Figura 33. A linha a tracejado representa a tendência linear de referência encontrada na zona de alta taxa de congelamento, entre os eixos A e B, na qual não existe grande variação da salinidade antes e após o congelamento, ou seja, a salinidade da água intersticial manteve-se em cerca de 13 g/L. Assim sendo, as tendências na resistência à compressão simples e o teor em água não congelada estão relacionadas entre si, ou seja, num local com um baixa taxa de volume de água não congelada a resistência à compressão é maior [NGUYEN et al., 2006].

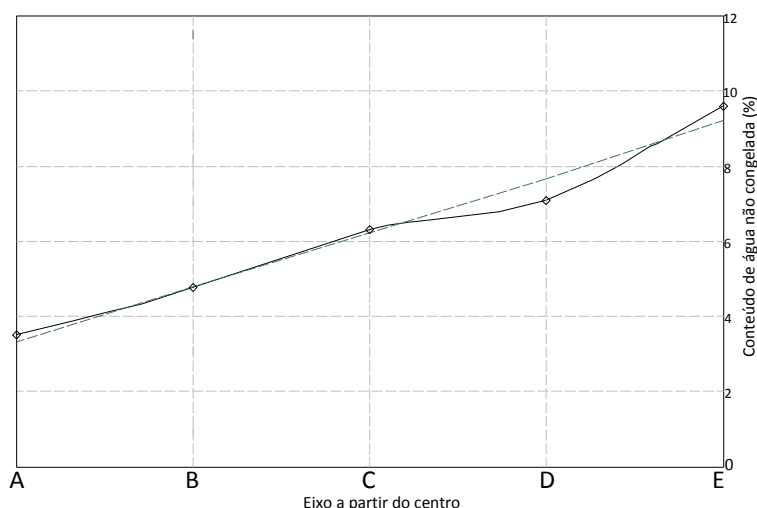


Figura 33. Distribuição de água não congelada ao longo do eixo a partir do centro (Fonte: adaptado de NGUYEN et al., 2006)

## **5.5. Propriedades físicas de solos congelados através da medição por técnicas de ultra-som**

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas num determinado meio reflecte as propriedades dinâmicas deste mesmo meio, as quais devem depender das propriedades físicas deste. Aproveitando a facilidade de operação e natureza não destrutiva da tecnologia do ultra-som, é possível determinar (indirectamente) algumas propriedades físicas de solos congelados, seja em laboratório, seja em campo.

De seguida são apresentados alguns resultados obtidos através desta técnica, onde se salientam as propriedades dinâmicas dos solos congelados, estabelecendo-se relações entre as velocidades ultra-sónicas e o teor de água não congelada, bem como a resistência do solo [SHENG et al., 2003].

### **5.5.1. Determinação directa de parâmetros dinâmicos de solos congelados**

As propriedades dinâmicas dos solos congelados são importantes para a exploração geofísica, escavação por explosão e design envolvendo máquinas de vibração. A propagação sónica, em solos congelados, é determinada por essas propriedades dinâmicas dos solos congelados, tais como  $E$ ,  $G$  e  $v$ .

Dada a densidade do solo congelado, podemos calcular as constantes elásticas referidas anteriormente, medindo a velocidade ultra-sónica em solos congelados. A Figura 34 mostra a relação entre a velocidade das ondas (longitudinal e transversal) e a temperatura, em amostras da zona de Lanzhou Loess, China. O teor em água da amostra é de 25% e a densidade seca de  $1,57 \text{ g/cm}^3$ .

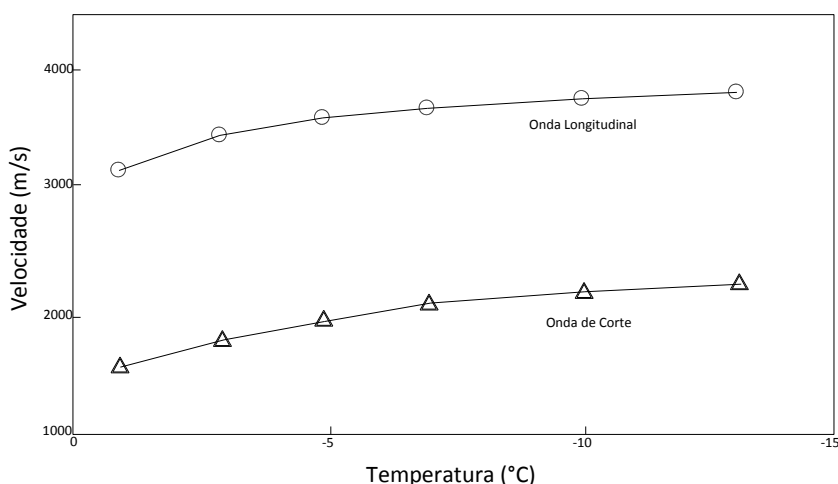


Figura 34. Relação entre velocidade de onda e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003)

O módulo de Young, o módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson são também relacionados a temperatura do solo congelado. As velocidades de ondas ultra-sônicas aumentam (longitudinal e transversalmente) com a diminuição da temperatura. Relativamente ao módulo de Young e ao módulo de rigidez, verifica-se que para temperaturas menores, o valor do respectivo do módulo aumenta (Figura 35). No caso do coeficiente de Poisson, verifica-se que a diminuição de temperatura provoca um decréscimo no valor do coeficiente (Figura 36) [SHENG et al., 2003].

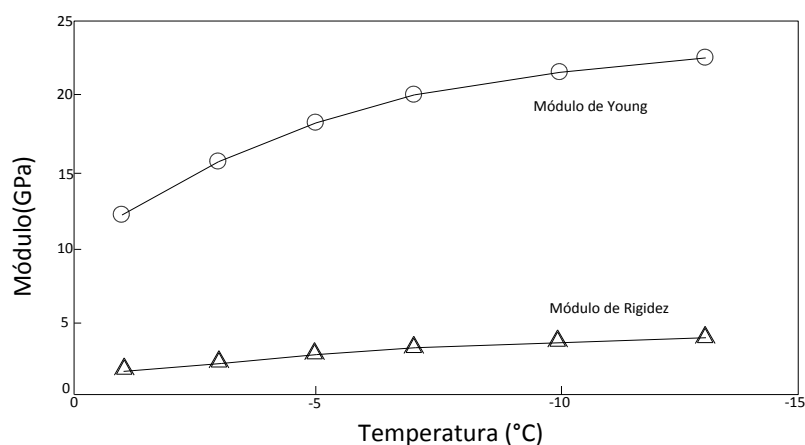


Figura 35. Relação entre módulo de Young (E) e módulo de rigidez (G) e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003)

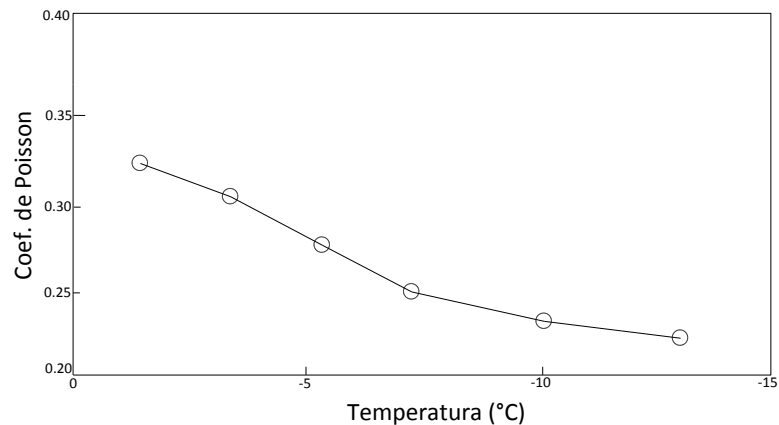


Figura 36. Relação entre coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003)

### 5.5.2. Resistência à compressão uniaxial e velocidades ultra-sônicas em solos congelados

Teoricamente, as velocidades ultra-sônicas não devem espelhar directamente as características de resistência de solos congelados. No entanto, quando um factor que afecta a resistência de um solo congelado se altera, a velocidade ultra-sónica num solo congelado também se altera. Se existir uma boa relação entre a resistência uniaxial e a velocidade das ondas deverá ser possível estimar a resistência uniaxial de solos congelados, através da relação de registos da medição das velocidades das ondas ultra-sónicas que se propagam em solos congelados.

Foram realizados testes de resistência à compressão, para diferentes temperaturas, em solos congelados, em Lanzhou Loess, China. Os resultados estão registados na Figura 37. Analisando o gráfico podemos concluir que com a diminuição da temperatura se registam valores mais elevados de resistência à compressão.

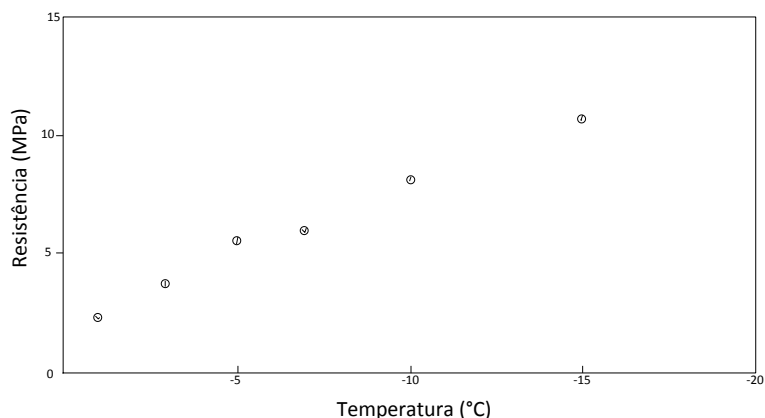


Figura 37. Resistência à compressão uniaxial *versus* temperatura (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003)

Combinando estes resultados com os apresentados na Figura 34, a resistência à compressão pode ser comparada com a velocidade longitudinal em função da temperatura, obtendo-se um gráfico como o representado na Figura 38.

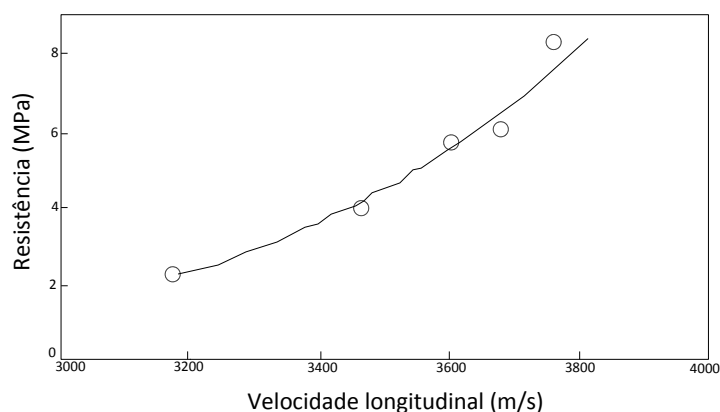


Figura 38. Relação entre resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas longitudinais em Lanzhou Loess, China (Fonte: adaptado de SHENG et al., 2003)

Verifica-se que a resistência de um solo congelado pode ser expressa como uma função de potência da velocidade longitudinal, quando a temperatura do solo congelado é alterada (uma vez que a velocidade longitudinal também varia com a temperatura). Quanto menor for a temperatura do solo congelado, mais rápida será a velocidade ultrasónica longitudinal e, por sua vez, maior será a resistência do solo [SHENG et al., 2003].

## 6. INTRODUÇÃO AO SOFTWARE TEMP/W<sup>®</sup> - ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica de um reservatório de congelamento pode ser modelada num software de cálculo térmico. Através desta análise é possível prever um determinado comportamento de um material, quando sujeito a uma alteração de temperaturas.

Neste capítulo é feita uma introdução ao programa TEMP/W<sup>®</sup>, tentando demonstrar as principais vantagens aquando da introdução de uma situação real de congelamento num software com estas características.

### 6.1. Introdução

O TEMP/W<sup>®</sup> é um software de elementos finitos, que pode ser usado para modelar alterações térmicas no solo, devido a mudanças ambientais ou a mudanças causadas por diversos tipos de construção, como por exemplo túneis, edifícios, gasodutos etc. A completa formulação torna possível analisar simultaneamente problemas de baixa e alta complexidade geotérmica, com ou sem temperaturas, que resultam em congelamento ou descongelamento do solo (Figura 39).

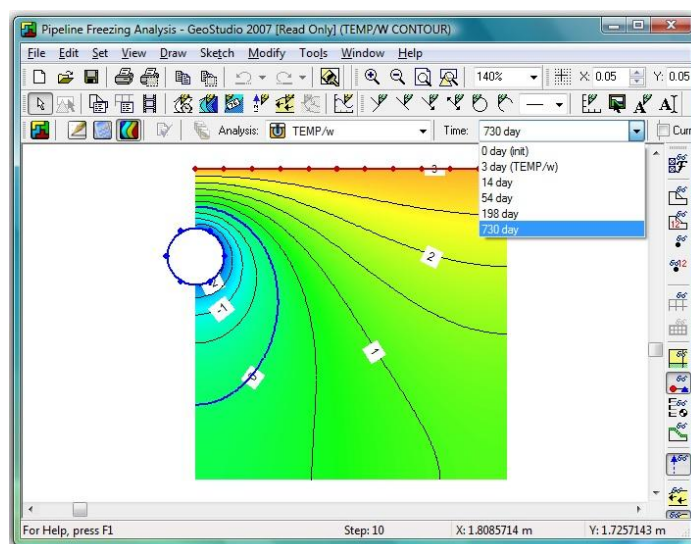


Figura 39. Exemplo de aplicação do software TEMP/W<sup>®</sup> (fonte:GEO-SLOPE<sup>®</sup>, 2010)

Uma suposição inerente a todas as análises feitas através do software TEMP/W<sup>®</sup> é o facto de o teor de humidade não ser alterado durante a resolução do problema. O solo não necessita de estar saturado, mas o teor de humidade total é assumido como fixo. Isto

significa que o somatório de gelo e água é sempre adicionado ao teor de humidade total por volume.

Também é possível modelar situações onde não exista qualquer teor de humidade no solo, o que significa que o software TEMP/W<sup>®</sup> pode ser utilizado para modelar transferências de calor, através de qualquer material poroso ou sólido.

## **6.2. Estabilização de solos através de congelamento - Análise TEMP/W<sup>®</sup>**

Para muitos projectos de engenharia geotécnica, a escavação em solos moles é necessária. O congelamento de solos, como já dito ao longo de todo este documento, é muitas vezes utilizado antes da escavação, proporcionando estabilidade ao solo. Para que o congelamento seja efectuado com sucesso alguns aspectos devem ser estimados e ponderados antes e durante o projecto. Consideremos, neste aspecto, o número apropriado de tubos de congelamento, a sua colocação, os requisitos de fluxo de energia, os tempos de congelamento, etc.

TEMP/W<sup>®</sup> é uma ferramenta extremamente útil para obter essas estimativas, dado que o congelamento do solo pode ser modelado numa base específica do local.

A Figura 40 mostra os resultados de uma modelação de um sistema de congelamento com simetria axial em torno de um único tubo, contendo salmoura no seu interior. Este exemplo específico pode ser usado para estimar exigências de fluxos de energia, tempo de congelamento e capacidade de congelamento através de um único furo. Uma análise simétrica axial funciona perfeitamente para um tubo de congelamento individual, mas na presença de múltiplos tubos de congelamento é necessário modelar quer a planta quer determinados cortes do esquema de congelamento. Estes tubos podem relacionar os diversos tubos adjacentes com o crescimento da parede congelada, mesmo existindo intersecção das diferentes frentes provocadas por cada tubo individual.



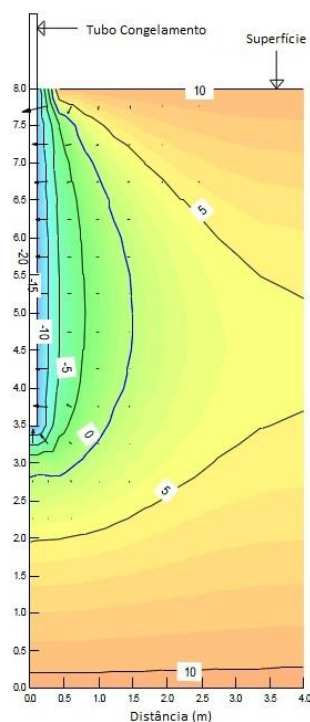


Figura 40. Análise TEMP/W em redor de um tubo de congelamento (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010)

### 6.2.1. Congelamento em torno de condutas refrigeradas - análise TEMP/W®

Condutas refrigeradas, que transportam inúmeros materiais/produtos tal como gás natural, nitrogénio líquido, entre outros, atravessam grandes distâncias percorrendo uma grande diversidade de solos. Um dos factores relevantes numa situação deste género é a necessidade de saber qual será o bolbo de gelo que se irá desenvolver em redor do tubo, o seu raio de acção e as condições temperatura *versus* tempo que se irão formar. Em solos susceptíveis à geada, a acção do gelo em redor do tubo fará com que este sofra levantamento vertical. Isto é especialmente problemático quando um tubo atravessa diferentes solos que contenham diferentes níveis de susceptibilidade de congelamento, podendo causar problemas no tubo que atravessa esta zona, ficando este sujeito a pressões que podem levar a uma rotura de material. Assim sendo, um projecto com este tipo de execução depende de factores como as condições e parâmetros dos diferentes tipos de solo, do material que irá circular nos tubos, dos seus diâmetros e espessura das paredes, das temperaturas e das quantidades de isolamento aplicados na parte externa. Aspecto fundamental ao projecto é a transferência de calor do solo para o

tubo, presente em ambas as análises *transient*, na fase *start - up* e na fase operacional (a longo prazo). Esta análise pode ser feita através do software Temp/w<sup>®</sup>, o qual executa as transferências de calor necessárias para o dimensionamento de um projecto de tubos de congelamento.

A Figura 41 mostra a distribuição, a longo prazo, da temperatura em torno de um tubo de congelamento. A análise mostra a profundidade de penetração do gelo abaixo do tubo, sendo possível determinar o fluxo de calor no seu interior a partir do solo circundante. Neste exemplo o fluxo do fluido está a afectar a forma do perfil térmico. É assim possível, através do software Temp/w<sup>®</sup>, criar qualquer situação real e estudar qual será o seu desempenho a curto, médio e longo prazo.

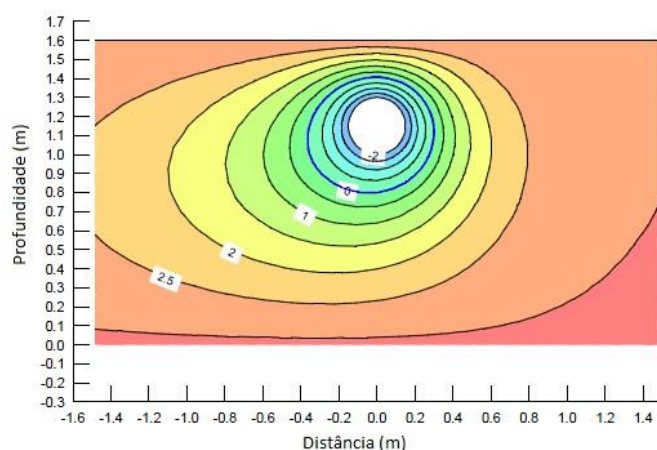


Figura 41. Evolução de temperaturas em redor de um tubo de congelamento (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE<sup>®</sup>, 2010)

### 6.3. Propriedades de materiais pré definidos pelo software

Existem cinco modelos de materiais que podem ser usados numa análise Temp/w<sup>®</sup>. Cada um deles permite inserir determinadas propriedades de um dado material, as quais influenciam o desenrolar de uma determinada situação que se pretende que seja estudada. O modelo utilizado foi o modelo térmico simplificado. A versão de licença de estudante permite ainda a utilização do modelo térmico completo e do modelo que permite retirar parte de um outro modelo. Na versão completa do programa é ainda possível a utilização do modelo de interface e do modelo térmico acoplado convexo. No caso escolhido para a modelação (modelo térmico simplificado) são introduzidos os seguintes parâmetros dos materiais:

- Capacidade térmica volumétrica do material congelado e descongelado;
- Condutividade térmica do material congelado e descongelado;
- Conteúdo volumétrico de água *in-situ*.

### 6.3.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica,  $K$ , que caracteriza a capacidade de um solo em transmitir calor por condução, é definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de um solo médio, com espessura unitária, numa determinada unidade de tempo e sob um gradiente de temperatura unitário. As unidades correntes da condutividade térmica são  $J/(\text{seg.m.}^{\circ}\text{C})$ ,  $\text{kJ}/(\text{dia.m.}^{\circ}\text{C})$  ou  $\text{Btu}/(\text{hora.ft.}^{\circ}\text{F})$ .

O manual de apoio ao software faculta valores característicos de condutividade térmica de certos tipos de solos, em função da temperatura (Figura 42) e também em função do volume de água da amostra (Figura 43). Estes valores podem ser utilizados nas análises de modelos térmicos completos e também em modelos térmicos convexos. No que se refere a outros materiais (por exemplo água, materiais rochosos, neve, etc.) podem ser utilizados valores também disponíveis no manual de apoio ao software, os quais se encontram no Anexo II do presente documento.

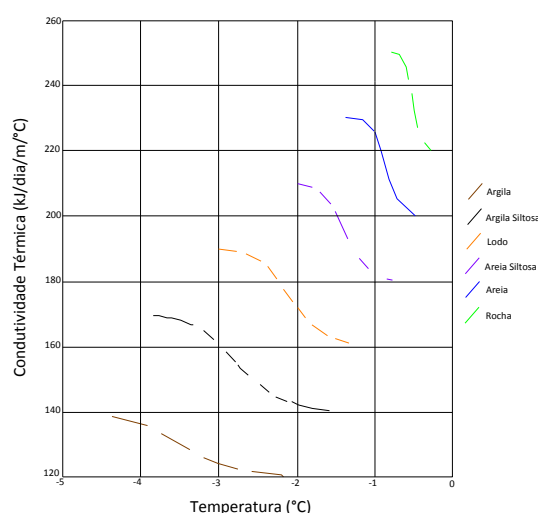


Figura 42. Valores característicos de condutividade térmica em função da temperatura da amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE<sup>®</sup>, 2010)

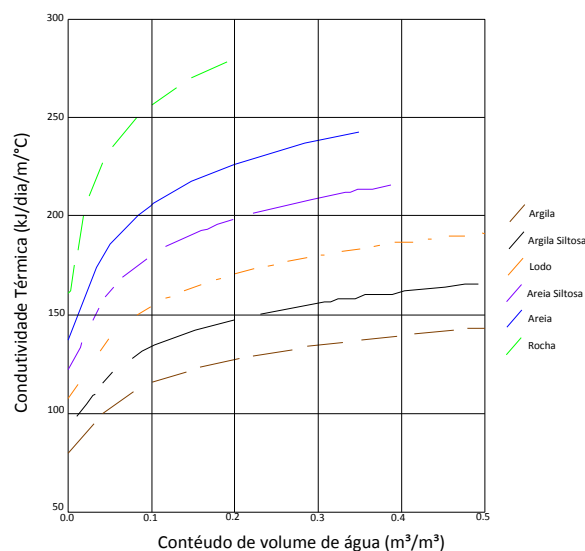


Figura 43. Valores característicos de condutividade térmica em função do conteúdo de volume de água da amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE®, 2010)

### 6.3.2. Capacidade térmica volumétrica

A capacidade térmica de um material é definida como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um dado material num grau unitário. Quando expressa numa base de peso unitário, esta quantidade de calor é conhecida como capacidade de calor específico e quando é expressa em relação ao volume unitário é denominada por capacidade térmica volumétrica. As unidades para a capacidade térmica volumétrica são  $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ,  $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$  ou  $Btu/(ft^3 \cdot ^\circ F)$ .

Também nesta secção do manual do software são fornecidos valores de capacidade térmica volumétrica de um solo, em função do conteúdo do volume de água (Figura 44). No Anexo II do presente documento estão também disponíveis valores tabelados pelo software, relativos à capacidade térmica volumétrica de alguns materiais.

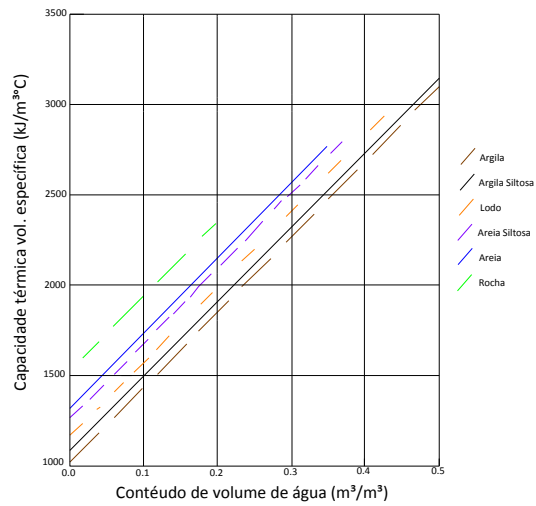


Figura 44. Valores característicos da capacidade térmica volumétrica em função do conteúdo de volume de água de uma amostra (Fonte: adaptado de GEO-SLOPE<sup>®</sup>, 2010)



## 7. ENSAIOS LABORATORIAIS

De seguida são apresentados todos os procedimentos e processos realizados a nível de ensaios de laboratório, com descrição detalhada e pormenorizada. Também neste capítulo é apresentada a calibração do modelo teórico de congelamento através do software TEMP/W<sup>®</sup>. Finalmente é feito o tratamento de dados recolhidos, bem como a sua análise/discussão.

### 7.1. Apresentação do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro

O equipamento de congelamento é constituído por três reservatórios (Figura 45, 47 e 48). O reservatório R1 é constituído por uma camada de 10 cm de isolamento de poliestireno, minimizando assim as perdas e transferências de calor.



Figura 45. Equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro

O sistema de arrefecimento (Figura 46) funciona a propilenoglicol e está ligado a um sistema de aquisição de dados, que regista a evolução das temperaturas ao longo do tempo, entre outros parâmetros. Existe ainda um sistema de abastecimento de água para os três reservatórios, com drenagem de água também incluída.



Figura 46. Sistema de arrefecimento da Universidade de Aveiro



Figura 47. Vista dos três reservatórios do sistema de congelamento da Universidade de Aveiro

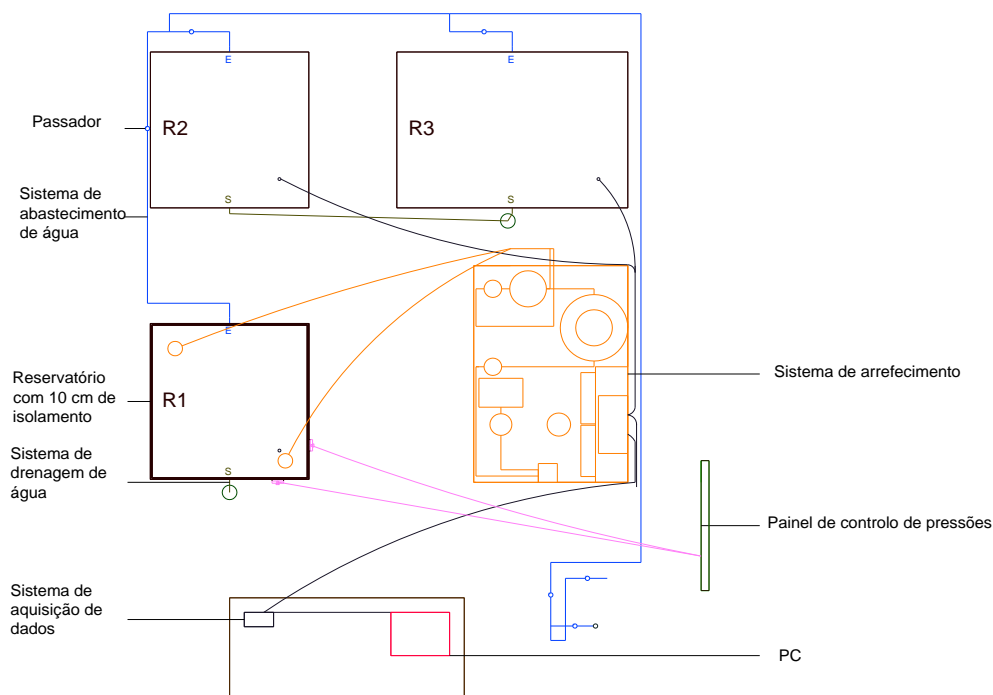


Figura 48. Esquema do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro  
(Fonte: BARBOSA et al., 2010)



Os tubos de congelamento são de aço inoxidável, com diâmetro exterior de 7 cm e comprimento de 75 cm (Figura 49).



Figura 49. Tubos de congelamento em aço inox

## **7.2. Apresentação e descrição das características da areia descongelada a ensaiar**

A areia recolhida para utilização nos ensaios de laboratório é uma areia da zona das dunas da praia de Mira, em Aveiro. De seguida são apresentadas as suas propriedades e características e ainda os ensaios realizados para a sua determinação.

### **7.2.1. Análise Granulométrica**

A análise granulométrica da areia proveniente de dunas da região de Mira foi feita segundo a norma NP EN 933-1 e NP EN 933-2. A primeira norma define o método para a análise granulométrica dos agregados, usando peneiros de ensaio. A segunda norma especifica as dimensões nominais das aberturas e o formato da tela (de arame e chapas perfuradas) dos peneiros de ensaio.

O ensaio consiste na peneiração, por meio de um conjunto de peneiros, de um material em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente. O método adoptado foi a peneiração, com lavagem seguida de peneiração a seco.

Os resultados da peneiração estão apresentados na tabela 3. A Figura 50 representa a curva granulométrica da areia, traçada em função das percentagens retidas em cada peneiro utilizado no ensaio.

Tabela 2: Pesagens iniciais da areia

<i>Massa seca total, M1</i>	424,89	g
Recipiente vazio (rv)	289,86	g
Massa seca após lavagem +recipiente vazio, (M2+rv)	713,45	g
Massa seca após lavagem (M2)	423,59	g
Massa seca de finos removidos por lavagem (M1-M2)	1,30	g

Tabela 3: Percentagens individuais em cada peneiro da análise granulométrica

<i>Nº Peneiro</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>Material retido (g)</i>	<i>% Material Retido</i>	<i>% Cumulativa de Material Retido</i>	<i>% Cumulativa de Material Passado</i>
4	4,750	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
10	2,000	0,48	0,11	0,11	<b>99,89</b>
20	0,850	2,81	0,66	0,77	<b>99,23</b>
40	0,425	77,33	18,20	18,97	<b>81,03</b>
60	0,250	288,34	67,86	86,84	<b>13,16</b>
140	0,106	53,92	12,69	99,53	<b>0,47</b>
200	0,075	0,50	0,12	99,64	<b>0,36</b>
-	Fundo	0,09	-	-	-
	Soma de controle	423,47			

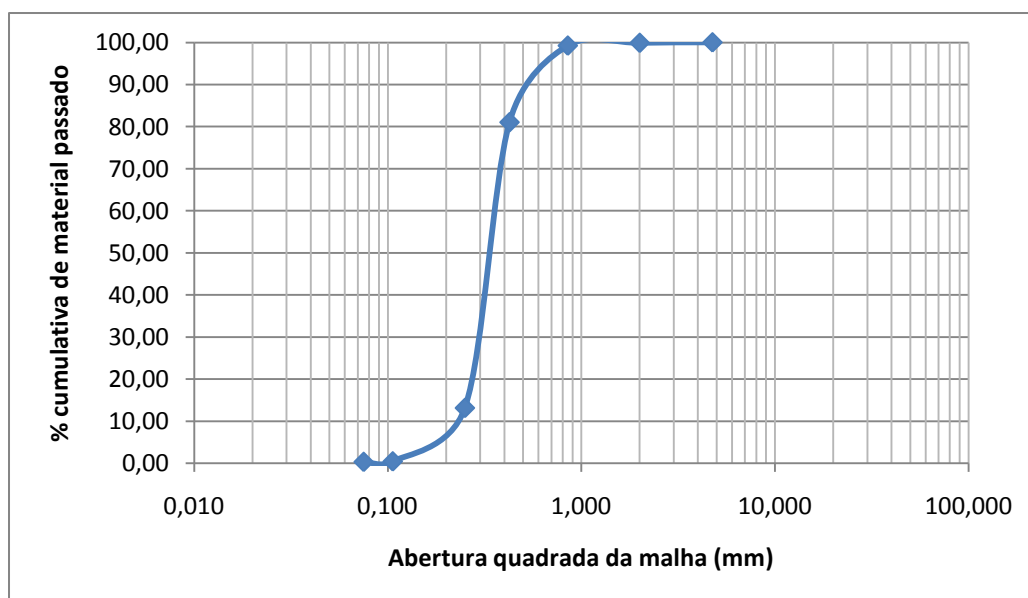


Figura 50. Curva Granulométrica

### 7.2.1.1. Classificação unificada da areia

A classificação unificada de solos é feita segundo a norma ASTM D 2487-85. Através da curva granulométrica e da tabela com as devidas percentagens retidas e passadas em cada peneiro, pode-se facilmente dizer que estamos perante uma Areia mal graduada (i) SP. Para isso foram calculados os índices  $C_u$  e  $C_c$  através das seguintes fórmulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7.1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (7.2)$$

Onde:

$C_u$  representa o coeficiente de uniformidade,

$C_c$  representa o coeficiente de curvatura,

$D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$  representam o diâmetro efectivo a 10%, 30% e 60% respectivamente.

Os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$  são, respectivamente, 0.22, 0.30 e 0.64. Os valores de  $C_u$  e de  $C_c$  são, respectivamente, 2.91 e 0.64.

### 7.2.1.2. Classificação para fins rodoviários da areia

A classificação para fins rodoviários, da areia, é feita segundo a norma LNEC E 240 - 1970. Através do quadro existente na norma, pode-se afirmar que a areia é do tipo A-3, ou seja, é uma areia fina, com comportamento na camada sob o pavimento de características excelente a bom.

## 7.2.2. Densidade das partículas

A densidade das partículas da areia foi determinada através da norma NP-83. Segundo a norma, densidade das partículas de um solo é o quociente entre a massa de um dado volume dessas partículas, à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada a 20°C.

Para a realização do procedimento de ensaio são necessários diversos utensílios (picnómetro, termómetro, estufa, etc.) encontrando-se estes enumerados na norma.

Neste caso específico foram utilizados dois picnômetros, para se obter um valor mais aproximado e com melhor correção.

A norma NP-83 estipula o seguinte procedimento de calibração do picnômetro:

Lava-se o picnômetro com água, seca-se e pesa-se ( $m_1$ ). Enche-se de água destilada e depois de levar o nível da água até ao traço de referência, pesa-se ( $m_2$ ).

Terminada a pesagem determina-se a temperatura da água ( $t_1$ ) e despeja-se o picnômetro.

Sendo:

$m_1$  a massa em gramas, do picnômetro,

$m_2$  a massa em gramas, do picnômetro cheio de água, à temperatura  $t_1$ ,

$d^{t_1}$  a densidade da água à temperatura  $t_1$  (ver tabela 4 do ponto seguinte),

$d^{t_x}$  a densidade da água à temperatura  $t_x$ ,

$m_3$  a massa em gramas corrigida, do picnômetro cheio de água, à temperatura  $t_x$ ,

Vem:

$$m_3 = \frac{d^{t_x}}{d^{t_1}} (m_2 - m_1) + m_1 \quad (7.3)$$

A norma NP-83 estipula o seguinte procedimento para a determinação da densidade das partículas num solo:

Sendo:

$m_3$  a massa em gramas, do picnômetro cheio de água, à temperatura  $t_x$ , determinada no ponto anterior,

$m_4$  a massa em gramas, do picnômetro do provete seco,

$m_5$  a massa em gramas, do picnômetro com o provete à temperatura  $t_x$ ,

$k'$  o quociente da densidade da água à temperatura  $t_x$ , pela densidade da água a 20°C (ver tabela 4),

Vem a densidade das partículas, à temperatura  $t_x$ , em relação à água destilada a 20°C:

$$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k' \quad (7.4)$$

Tabela 4: Tabela da densidade da água e do factor k'

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Densidade</i>	<i>k'</i>
10	0,99973	1,002
11	0,99963	1,001
12	0,99953	1,001
13	0,99941	1,001
14	0,99927	1,001
15	0,99913	1,001
16	0,99897	1,001
17	0,99880	1,001
18	0,99862	1,000
19	0,99843	1,000
20	0,99823	1,000
21	0,99802	1,000
22	0,99780	1,000
23	0,99757	0,999
24	0,99733	0,999

Após leitura e análise da norma, e respectivos ensaios, procedeu-se ao cálculo da densidade das partículas, tendo sido registados os seguintes valores necessários para o seu cálculo.

Tabela 5: Calibração dos picnómetros

	<i>Pic. 72</i>	<i>Pic. 73</i>
m <sub>1</sub>	220,19	223,09
m <sub>2</sub>	893,97	889,45
$d^{tx}$	0,99802	0,99802
$d^{t1}$	0,99802	0,99802
m <sub>3</sub>	893,97	889,45

Os valores de  $d^{tx}$  e de  $d^{t1}$  foram ambos retirados a temperaturas de 21°C.

Tabela 6: Cálculo da massa volúmica das partículas

	<i>Pic. 72</i>	<i>Pic. 73</i>
m <sub>3</sub>	893,97	889,45
m <sub>4</sub>	500,13	500,55
m <sub>5</sub>	1204,71	1200,02
k'	1	1
Valor Final $d_{20}^{tx}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,641	2,635
Valor corrigido $d_{20}^{tx}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,638	

Assim sendo, e como era de esperar, tendo em conta que o solo a analisar é uma areia, o valor da massa volúmica das partículas é de 2,638 g/cm<sup>3</sup>.

### 7.2.3. Baridade

A baridade da areia foi determinada através da norma NP EN 1097-3. Segundo a norma, baridade de um solo é o quociente entre a massa do agregado seco preenchendo sem compactação um dado recipiente, pela capacidade do recipiente. A capacidade mínima do recipiente é escolhida consoante a dimensão máxima do agregado (tabela 7). Os restantes materiais e utensílios encontram-se enumerados na norma, onde também se encontra o procedimento de ensaio, sendo de seguida apenas apresentado o cálculo para obtenção do valor e o respectivo resultado.

Tabela 7: Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado

<i>Máxima dimensão do agregado (D) (mm)</i>	<i>Capacidade (l)</i>
Até 4	1,0
Até 16,0	5,0
Até 31,5	10
Até 63	20

A baridade é calculada em cada provete elementar segundo a seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (7.5)$$

Onde:

$\rho_b$  é a baridade em megagramas por metro cúbico,

$m_2$  é a massa do recipiente e do provete elementar, em quilogramas,

$m_1$  é a massa do recipiente vazio, em quilogramas,

$V$  é a capacidade do recipiente, em litros.

Após leitura e análise da norma procedeu-se ao cálculo da baridade, tendo sido registados os seguintes valores.

Tabela 8: Cálculo da baridade do solo

	<i>Provete 1</i>	<i>Provete 2</i>	<i>Provete 3</i>
$m_2$	1,61882	1,63068	1,62864
$m_3$	1,10084	1,10084	1,10084
$m_1$	0,10445	0,10445	0,10445
V	0,9964	0,9964	0,9964
$\rho_b$	1,5199	1,5318	1,5297

<i>Valor corrigido final</i>	<i>1,530</i>	<i>Mg/m<sup>3</sup></i>
------------------------------	--------------	-------------------------

$m_3$  representa a massa do recipiente cheio com água, em quilogramas.

#### 7.2.4. Teor em água

O teor em água,  $w$ , foi determinado segundo a norma NP 84. Segundo a norma, o teor em água, de um provete, é o quociente em percentagem, entre a massa de água que se evapora a temperaturas de 105°C e 110°C pela massa do provete depois de seco.

O teor em água pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$w = 100 \times \frac{(m_2 - m_3)}{(m_3 - m_1)} \quad (7.6)$$

Onde:

$w$  representa o teor em água, em percentagem,

$m_1$  representa a massa da cápsula, em gramas,

$m_2$  representa a massa da cápsula mais o solo, em gramas, antes da secagem,

$m_3$  representa a massa da cápsula mais o solo, em gramas, depois da pesagem.

Após a realização do procedimento, obtiveram-se os resultados expressos na tabela 9.

Tabela 9: Cálculo do teor em água

<i>Massa da cápsula (g)</i>	<i>289,86</i>
Massa da cápsula mais massa do solo (g)	731,02
Massa da cápsula mais massa do solo seco em estufa (g)	714,75
Massa do solo seco em estufa (g)	424,89
Massa de água (g)	16,27
Teor em água, $w$ (%)	3,83%

Assim sendo, o valor do teor em água do solo é de 3,83%.

#### 7.2.5. Percentagem de Vazios

A percentagem de vazios da areia foi determinada através da norma NP EN 1097-3. Segundo a norma, a percentagem de vazios  $v$  é a proporção volumétrica de vazios no recipiente e é calculada segundo a seguinte equação:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100 \quad (7.7)$$

Onde:

$v$  representa a percentagem de vazios;

$\rho_b$  representa a baridade, em megagramas por metro cúbico;

$\rho_p$  representa a massa volúmica real do agregado seco em estufa, em megagramas por metro cúbico;

A percentagem de vazios é facilmente calculada, uma vez que já é conhecido o valor da baridade e da massa volúmica, valores determinados anteriormente. Assim sendo temos:

$$v = 0,4201$$

$$v(\%) = 42,01 \%$$

#### 7.2.6. Permeabilidade

Pode-se definir como permeabilidade de um solo a capacidade que este tem em permitir o escoamento de água através dos seus vazios, sendo a grandeza da permeabilidade expressa pelo coeficiente de permeabilidade de um solo,  $k$  (CAVALCANTE, 2006).

Pela lei de Darcy (1856) temos:

$$v_p = k_p \times i \quad (7.8)$$

Onde:



$v_p$  representa a velocidade real de percolação ou velocidade com que a água atravessa o solo;

$k_p$  representa o coeficiente de percolação;

$i$  representa o gradiente hidráulico  $i = \frac{\Delta h}{L}$ ;

$\Delta h$  representa a diferença de carga (perda de carga por percolação no comprimento  $L$ );

$L$  representa o comprimento de solo na direcção do escoamento.

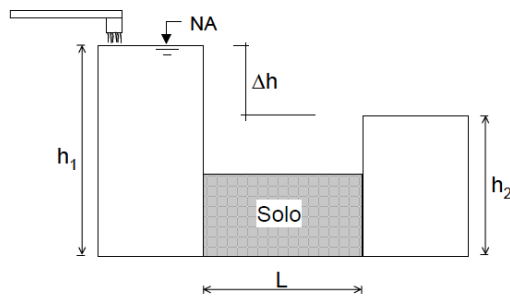


Figura 51. Modelo simplificado para obtenção do coeficiente de permeabilidade (Fonte: CAVALCANTE, 2006)

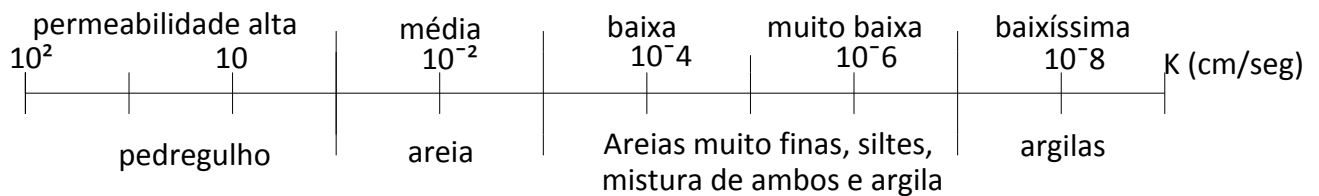


Figura 52. Intervalos de variação do coeficiente de permeabilidade (Fonte: adaptado de CAVALCANTE, 2006)

Considera-se que um solo é impermeável quando  $k$  toma valor  $1,3 \times 10^{-8}$  cm/s.

#### 7.2.6.1. Fórmula empírica de Hazen (para areias uniformes)

A fórmula utilizada neste caso é a seguinte:

$$k = C \cdot (D_{10})^2 \quad (7.9)$$

Onde:

$k$  representa o coeficiente de permeabilidade (em cm/s);

$D_{10}$  representa o diâmetro efectivo (em cm);

$C$  representa o coeficiente de Hazen ( $100 \leq C \leq 150$ ).

#### 7.2.6.2. Permeâmetro de carga constante

Neste caso, o coeficiente de permeabilidade determina-se medindo a quantidade de água " $V$ ", mantida a nível constante, que atravessa num determinado tempo " $t$ " uma amostra de solo num provete de secção " $A$ " e altura " $L$ " conhecidas (Figura 53).

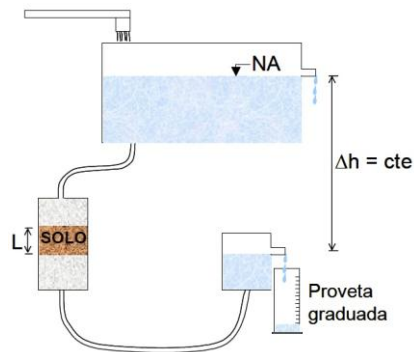


Figura 53. Modelo prático para obtenção do coeficiente de permeabilidade - Carga constante (Fonte: CAVALCANTE, 2006)

A expressão que permite calcular o coeficiente de permeabilidade nesta situação é:

$$k = \frac{V \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t} \quad (7.10)$$

Onde:

$k$  representa o coeficiente de permeabilidade (em cm/s),

$V$  representa o volume de água na proveta graduada (em ml),

$L$  representa a altura do provete (em metros),

$\Delta h$  representa a diferença de altura entre a cota do nível superior de água e a cota da saída de água (em metros),

$A$  representa a secção do provete (em metros quadrados),

$t$  representa o tempo de duração do ensaio (em segundos).

#### 7.2.6.3. Permeâmetro de carga variável

No caso em que a carga varia, o coeficiente de permeabilidade é calculado através da seguinte expressão:

$$k = \frac{L \cdot a}{A \cdot (\Delta t)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (7.11)$$

Onde:

$k$  representa o coeficiente de permeabilidade (em cm/s);

$L$  representa a altura do provete (em metros),

$\Delta t$  representa o intervalo de tempo que decorre o ensaio (em segundos)

$A$  representa a secção do provete (em metros quadrados),

$a$  representa a secção transversal da bureta (em metros quadrados),

$h_1$  representa a cota inicial de água (em metros),

$h_2$  representa a cota final de água (em metros).

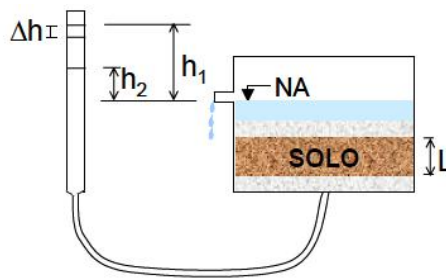


Figura 54. Modelo prático para obtenção do coeficiente de permeabilidade - Carga variável (Fonte: CAVALCANTE, 2006)

#### 7.2.6.4. Resultados

Tabela 10: Resultados permeabilidade - Fórmula empírica de Hazen

$D_{10} \text{ (mm)}$	$C$	$k \text{ (cm/s)}$
0,22	100	4,84E-02
0,22	150	7,26E-02

Tabela 11: Resultados permeabilidade - Permeâmetro carga constante

	$L \text{ (m)}$	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta h \text{ (m)}$	$V \text{ (mL)}$	$V \text{ (m}^3\text{)}$	$t \text{ (seg.)}$	$k \text{ (m/s)}$	$k \text{ (cm/s)}$
Ensaio 1	0,3278	1,66E-03	1,931	92	0,000092	25,1	3,74E-04	3,74E-02
Ensaio 2	0,3278	1,66E-03	1,931	83	0,000083	24,15	3,51E-04	3,51E-02

Tabela 12: Resultados permeabilidade - Permeâmetro carga variável

	$a \text{ (m}^2\text{)}$	$L \text{ (m)}$	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$h_1 \text{ (m)}$	$h_2 \text{ (m)}$	$\Delta t \text{ (seg.)}$	$k \text{ (m/s)}$	$k \text{ (cm/s)}$
Ensaio 1	7,54E-05	0,3278	1,66E-03	1,99	1,07	24,1	3,83E-04	3,83E-02
Ensaio 2	7,54E-05	0,3278	1,66E-03	1,988	1,084	23,25	3,88E-04	3,88E-02

O permeâmetro utilizado tem massa de 402,5 gramas e a o seu peso com areia saturada é de 1415 gramas.

### 7.3. Ensaio e procedimentos realizados

#### 7.3.1. 1ª Fase - Congelamento de água

Sendo necessário iniciar o processo de congelamento com o equipamento descrito no ponto 7.1, o primeiro material a ser utilizado para ser submetido ao processo, foi a água. Através deste ensaio, facilmente se podem retirar conclusões acerca de variados aspectos, que posteriormente serão abordados.

O congelamento da água serviu para retirar relações interessantes, nomeadamente as temperaturas *versus* tempo de congelamento, temperaturas *versus* distâncias ao centro do tubo de congelamento, temperaturas *versus* distâncias verticais no reservatório, raios de acção dos tubos e energias gastas no processo, entre outros.

O reservatório utilizado foi o reservatório R1, onde dois tubos de congelamento foram dispostos do seguinte modo (Figura 55):



Figura 55. Colocação dos tubos de congelamento para a 1ª fase dos ensaios

Foram também utilizadas 4 sondas (termo - pares) para se poderem registar as temperaturas ao longo do tempo. A colocação destas sondas foi ajustada com o propósito de obter a evolução das temperaturas numa zona próxima dos tubos, e numa zona intermédia (a meio dos dois tubos), sendo possível registar temperaturas na parte superior (duas sondas superiores) e temperaturas na parte inferior (duas sondas inferiores) (Figura 56 e 57).

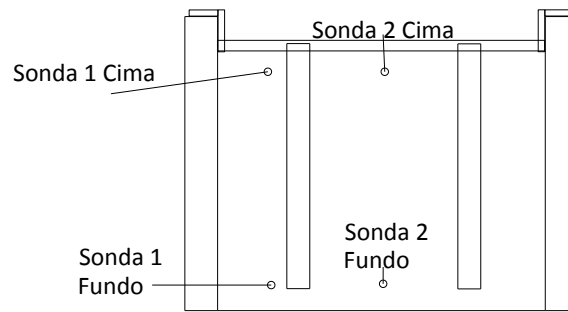


Figura 56. Esquema de colocação das sondas (termo - pares) no reservatório R1



Figura 57. Sonda utilizada para registo de temperaturas

A distância vertical do ponto de leitura das sondas superiores foi de 25 cm, medidos a partir do topo do reservatório, enquanto as sondas inferiores foram colocadas a cerca de 20 cm da base do reservatório. O registo das temperaturas pode ser consultado no Anexo I do presente documento, onde estão registados os dados compreendidos entre 31/01/2011 e 21/02/2011. Para uma consulta mais detalhada, estão também disponíveis, no CD da dissertação, os mesmos dados, com intervalos de leitura de 30 minutos e durante as mesmas datas. Na Figura 58 é já possível identificar duas zonas distintas de congelamento, provocadas pelo processo de congelamento.



Figura 58. Congelamento de água (1ª fase)

### 7.3.2. 2ª Fase - Temperaturas areia congelada

Após a realização dos ensaios relativos à primeira fase dos ensaios, procedeu-se à realização da segunda, e última, fase dos ensaios. Esta fase é caracterizada pela introdução de areia no reservatório R1. Foram, também, colocados dois tubos de congelamento, 6 sondas e 3 termo-pares para registos de temperaturas.

A colocação das sondas e dos termo-pares é representada na Figura 59. As 6 sondas foram colocadas em grupos de 2, uma à cota do fundo dos tubos de congelamento e outra próxima da cota de topo da areia. Os 3 termo-pares foram colocados à cota entre as sondas de cima e as sondas de fundo.

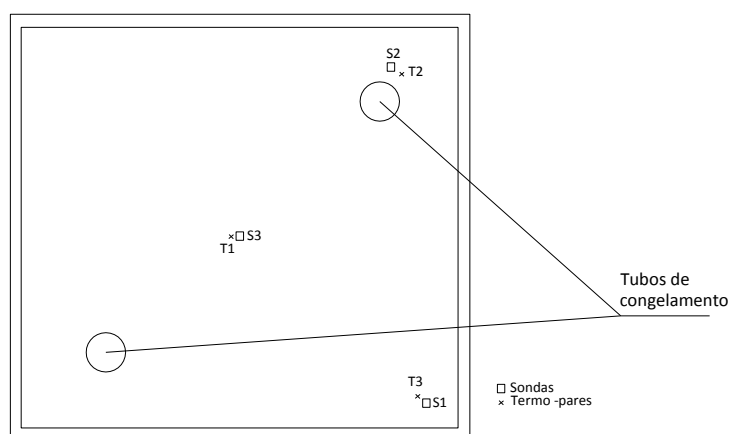


Figura 59. Planta do reservatório R1 - colocação de sondas e termo-pares

Após a colocação da areia, esta foi saturada, com a introdução de água. De seguida foi iniciado o processo de congelamento. Após algumas horas já era possível verificar que a areia em volta dos tubos se encontrava em estado congelado, como se pode ver na Figura 60 e 61. Cerca de 10 dias depois do início do processo o raio de acção dos tubos é já superior, notando-se através do toque na areia que esta se encontrava congelada em redor dos tubos (Figura 62).



Figura 60. Início do processo de congelamento da areia



Figura 61. Pormenor do tubo de congelamento e areia congelada (1º dia)

O registo das temperaturas pode ser consultado no Anexo III do presente documento, onde estão registados os dados compreendidos entre 03/06/2011 e 17/06/2001. Para uma consulta mais detalhada encontram-se disponíveis, no CD da dissertação os mesmos dados, com intervalos de leitura de 30 minutos e durante as mesmas datas.

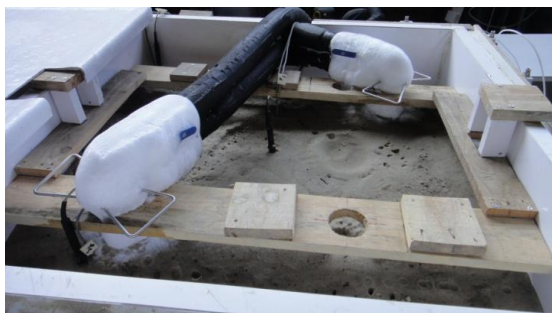


Figura 62. Processo de congelamento - 10º dia

Sensivelmente 15 dias depois de se ter iniciado o processo de congelamento da areia, e com o intuito de se observar o estado dos bolbos formados em cada tubo de congelamento, esvaziou-se cerca de metade do reservatório. Registou-se assim o estado em que se encontrava o bolbo formado em cada tubo (Figura 63 e 64).



Figura 63. Bolbo de congelamento de areia - Tubo 1 (15º dia)



Figura 64. Bolbo de congelamento de areia - Tubo 2 (15º dia)

#### **7.4. Calibração do modelo teórico através do Software TEMP/W<sup>®</sup> - 1ª Fase**

Após o registo das temperaturas da primeira fase dos ensaios (ver 7.3.1), o objectivo passou por tentar aproximar ao máximo o modelo teórico dos dados reais verificados no congelamento da água.

O software de modelação permite a introdução de condições fronteira, tipos de materiais e suas características/parâmetros térmicos e energéticos, temperaturas e processos de iteração, capazes de prever os avanços dessas temperaturas ao longo do tempo de um determinado processo de congelamento. Assim sendo, a finalidade desta modelação é verificar que, estando esta próximo da realidade, é possível introduzir outros materiais no modelo, com diferentes propriedades e prever a sua evolução, de uma maneira fácil e prática.



#### 7.4.1. Características do reservatório

O reservatório, modelado a partir do reservatório R1, foi introduzido no programa com as seguintes características:

- Altura: 0,9 metros;
- Largura: 1,0 metros;
- Espessura do isolamento: 0,10 metros.

A representação no software do reservatório é feita a duas dimensões e, portanto, a zona nele escolhida para ser representada foi a secção onde estão colocados os tubos de congelamento, a zona de corte AA' (Figura 65).

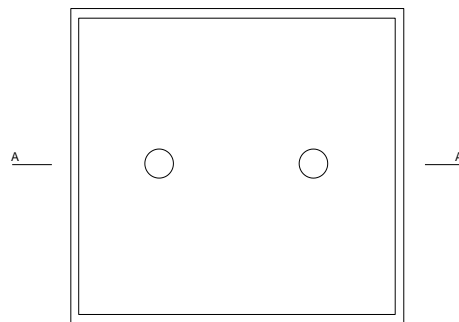


Figura 65. Esquema do corte AA' do reservatório R1

Os tubos de congelamento foram colocados a 26 cm a partir da cada parede do reservatório, respectivamente, e a altura admitida de cada um foi de 75 cm (Figura 66). Os tubos de congelamento têm 0,7 cm de diâmetro.

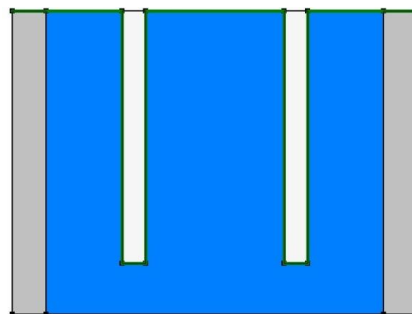


Figura 66. Reservatório R1 - Corte AA' modelado no software (fonte: TEMP/W<sup>®</sup>)

### 7.4.2. Condições fronteira do modelo

Para que o modelo possa ficar perto da realidade é necessário introduzir condições fronteira em todas as zonas do reservatório que foi desenhado no programa. Um dos aspectos relevantes na modelação do processo de congelamento é a necessidade de introdução de uma fase inicial das condições fronteira, e uma fase posterior com condições finais. Isto acontece porque só assim o programa consegue atingir um equilíbrio de temperaturas num espaço de tempo imposto pelo programador. Considerando apenas a situação inicial, o programa não conseguiria distinguir uma evolução dos parâmetros e, consequentemente, não é possível apresentar uma evolução de temperaturas ao longo do tempo. O que aconteceria era que iria apenas ser apresentado um único ponto de equilíbrio entre as condições fronteira no reservatório.

No caso de estudo, foram impostas as condições fronteira (Figura 67):

- Temperatura ambiente;
- Temperatura de saída tubos de congelamento;
- Temperatura de contacto entre o betão armado e o reservatório;
- Temperatura inicial da água;
- Temperatura de contacto reservatório/água;
- Temperatura topo da água (fase final congelamento).

Name	Category	Color
Temperatura ambiente	Thermal	Red
Temperatura de saída dos Tubos de congelamento	Thermal	Blue
Contacto Betão Reservatório	Thermal	Magenta
Temperatura inicial água	Thermal	Cyan
Temperatura de contacto água/paredes	Thermal	Green
Temperatura topo água (fase final)	Thermal	Orange

Figura 67. Condições fronteira da modelação (fonte: TEMP/W<sup>®</sup>)

#### 7.4.2.1. Condições fronteira iniciais

As condições fronteira iniciais foram impostas admitindo valores reais de temperatura (Figura 68), nomeadamente a temperatura ambiente do espaço onde se

encontrava o reservatório, a temperatura inicial da água e a temperatura do pavimento (betão armado). Assim sendo, foram admitidas as seguintes temperaturas:

- Temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de saída tubos de congelamento ( $-8,75^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de contacto entre o betão armado e o reservatório ( $7^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura inicial da água ( $20^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de contacto reservatório/água ( $1^{\circ}\text{C}$ );

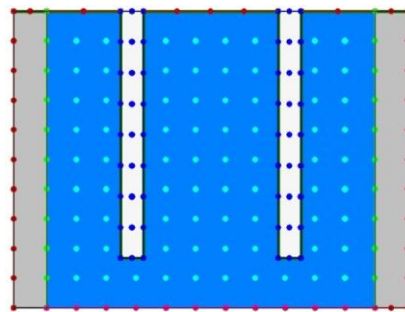


Figura 68. Condições fronteira iniciais (fonte: TEMP/W<sup>®</sup>)

#### 7.4.2.2. Condições fronteira finais

As condições fronteira finais (Figura 69) são, basicamente, as mesmas que as iniciais, diferindo apenas em dois aspectos. O primeiro é a temperatura da água que é retirada, para que o programa possa fazer o equilíbrio entre a temperatura inicial da água e a temperatura dos tubos de congelamento. O segundo é a temperatura do topo da água, que obviamente será menor na parte final do congelamento. Para isso adoptou-se uma temperatura de  $-0,2^{\circ}\text{C}$ , sendo assim possível atingir um modelo mais próximo da realidade.

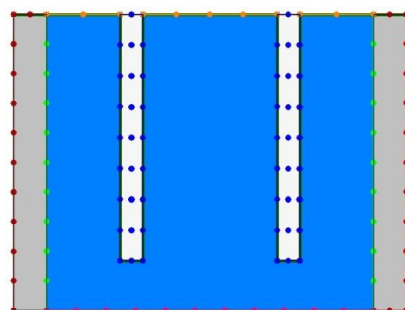


Figura 69. Condições fronteira finais (fonte: TEMP/W<sup>®</sup>)

#### 7.4.3. Propriedades da água e propriedades do isolamento

As propriedades da água descongelada e congelada foram retiradas das tabelas fornecidas pelo manual do software, que podem ser consultadas no Anexo II do presente documento:

- Condutividade térmica (descongelada): 52,27 kJ/dia/m/°C;
- Condutividade térmica (congelada): 192 kJ/dia/m/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (descongelada): 4187 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (congelada): 1880 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Conteúdo volumétrico de água *in-situ*: 1 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

As propriedades do isolamento de poliestireno admitidas foram as seguintes:

- Condutividade térmica (descongelada): 0,037 kJ/dia/m/°C;
- Condutividade térmica (congelada): 0,037 kJ/dia/m/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (descongelada): 1,5 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (congelada): 1,5 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Conteúdo volumétrico de água *in-situ*: 0 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

#### 7.4.4. Resultados obtidos da modelação

Feita a introdução de todos os dados necessários no programa de cálculo (condições fronteira, propriedades dos materiais, propriedades e características do reservatório, tubos, etc.), e após escolha dos intervalos de tempo nos quais serão apresentados os resultados da evolução das temperaturas, foi obtido o seguinte modelo teórico:

Situação inicial (0 dias):

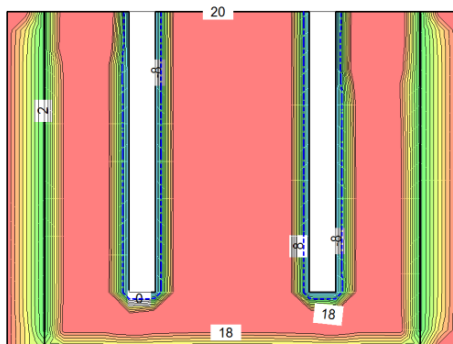


Figura 70. Situação inicial (0 dias) - modelação reservatório R1 com água

Situação intermédia (8.8 dias):

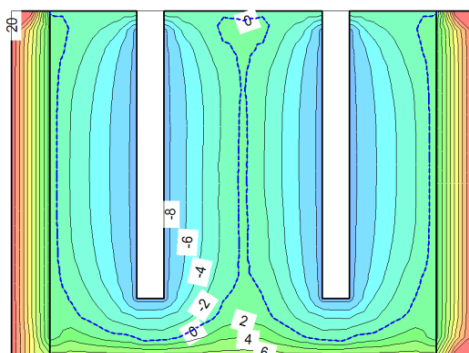


Figura 71. Situação intermédia (8.8 dias) - modelação reservatório R1 com água

Situação final (22 dias):

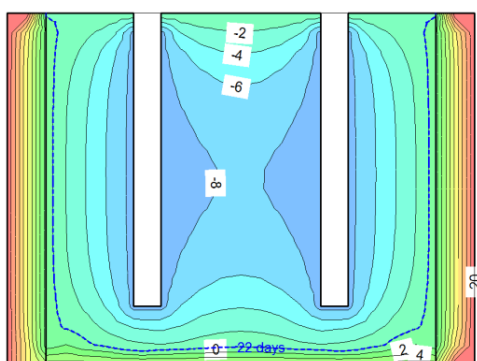


Figura 72. Situação intermédia (22 dias) - modelação reservatório R1 com água

A análise dos resultados obtidos da modelação será feita na secção 7.6.1. e na secção

## 7.5. Calibração do modelo teórico através do Software TEMP/W<sup>®</sup> - 2ª Fase

Tal como se fez para a 1ª fase dos ensaios relativos ao congelamento de água, também da mesma maneira foi efectuado um modelo teórico aproximado, de acordo com os resultados obtidos nas temperaturas da areia congelada.

De seguida são expostos os parâmetros que sofreram alterações em relação ao 1º modelo, assumindo que os restantes parâmetros se mantêm iguais na modelação (por exemplo as características e propriedades do isolamento).

### 7.5.1. Características do reservatório

A representação do reservatório no software é feita a duas dimensões, como já referido anteriormente, e portanto a zona escolhida para ser representada foi a secção onde estão colocados os tubos de congelamento, a zona de corte BB' (Figura 73). A diagonal tem um comprimento equivalente, no reservatório, a 1,40 metros.

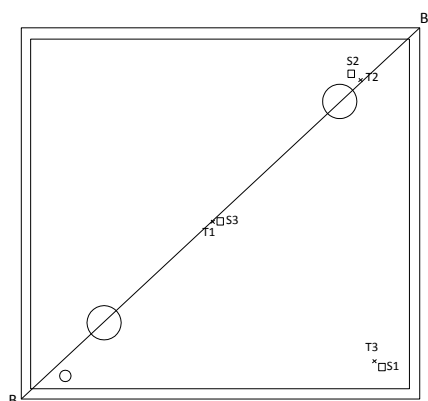


Figura 73. Planta com o corte BB' representativo do reservatório R1

Os tubos de congelamento foram colocados a 20 cm a partir da cada esquina do reservatório, respectivamente, e a altura admitida, de cada um, foi de 75 cm. Os tubos de congelamento têm 0,7 cm de diâmetro.

### 7.5.2. Condições fronteira do modelo

As condições fronteira estipuladas para este modelo teórico são bastante semelhantes às do modelo da 1ª fase dos ensaios, existindo diferenças apenas no que

respeita a temperaturas impostas. Do mesmo modo foram admitidas condições fronteira iniciais e finais (Figura 74 e 75), para que fosse possível efectuar uma evolução de temperaturas ao longo dos dias. A diferença apenas reside na substituição das condições fronteira relativas à água pelas da areia (iniciais e finais).

Neste caso, foram impostas as seguintes condições fronteira:

- Temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de saída nos tubos de congelamento (inicial) ( $-8.75^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de saída nos tubos de congelamento (final) ( $-8.75^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de contacto entre o betão armado e o reservatório ( $7^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura inicial da areia ( $22^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura de contacto reservatório/areia ( $4^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura topo da areia (fase final congelamento) ( $4^{\circ}\text{C}$ ).

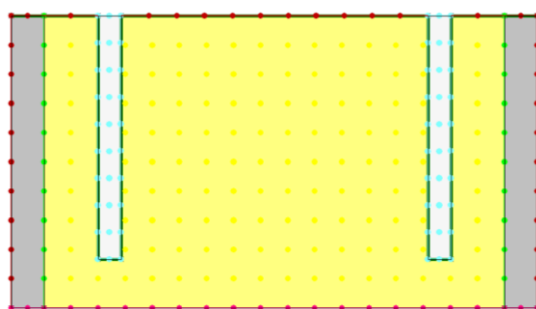


Figura 74. Condições fronteira iniciais do congelamento de areia

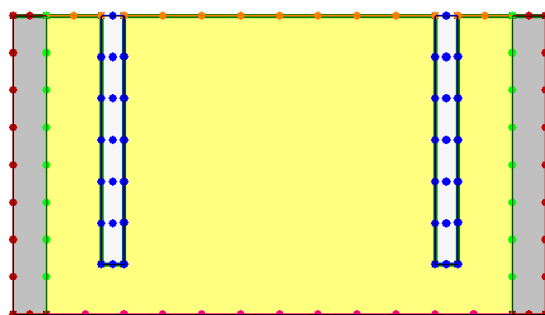


Figura 75. Condições fronteira finais do congelamento de areia

### 7.5.3. Propriedades da areia

As propriedades da areia descongelada e congelada foram fornecidas pelos gráficos facultados pelo manual do software, que podem ser consultados no capítulo 6 do presente documento. Admitindo uma percentagem de vazios de 42% temos que:

- Condutividade térmica (descongelada): 245 kJ/dia/m/°C;
- Condutividade térmica (congelada): 320 kJ/dia/m/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (descongelada): 3000 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Capacidade térmica volumétrica (congelada): 1900 kJ/m<sup>3</sup>/°C;
- Conteúdo volumétrico de água *in-situ*: 0,42 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

#### 7.5.4. Resultados obtidos da modelação

Feita a introdução de todos os dados necessários no programa de cálculo (condições fronteira, propriedades dos materiais, propriedades e características do reservatório, tubos, etc.), e após escolha dos intervalos de tempo nos quais serão apresentados os resultados da evolução das temperaturas, foi obtido o seguinte modelo teórico para um reservatório com areia no seu interior:

Situação inicial (0 dias):

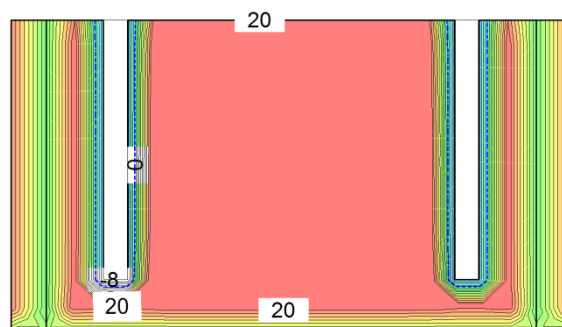


Figura 76. Situação inicial (0 dias) - modelação reservatório R1 com areia



Situação intermédia (10 dias):

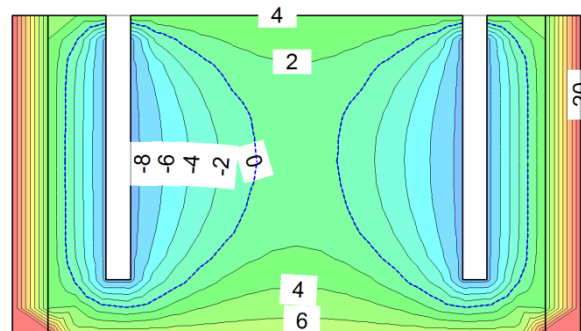


Figura 77. Situação inicial (10 dias) - modelação reservatório R1 com areia

Situação final (20 dias):

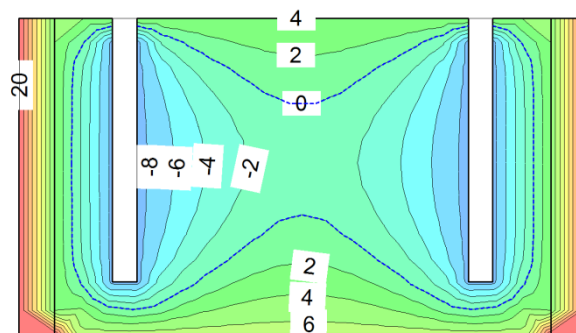


Figura 78. Situação final (20 dias) - modelação reservatório R1 com areia

## 7.6. Tratamento de dados

### 7.6.1. Resultados da comparação do modelo teórico *versus* dados reais - 1ª Fase

Após a calibração do modelo teórico no software, é feita a comparação entre os dados reais e os dados do modelo teórico. A análise foi feita nas quatro sondas (duas superiores e duas inferiores). Seguidamente são apresentados os resultados deste confronto de dados. Primeiro é apresentada uma tabela com as temperaturas ao longo dos dias, no modelo teórico, seguindo-se o gráfico que tem por conteúdo as duas rectas de evolução de temperaturas ao longo dos dias, nos dois modelos referidos anteriormente.

O software permite a escolha de um nó da malha do modelo, podendo ser feito o gráfico temperatura *versus* tempo, ao qual será sobreposto o evoluir das temperaturas que se verificaram na realidade, na primeira fase dos ensaios.

Tabela 13: Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 1 Cima

SONDA 1 - CIMA	
Nó 96 (1.12925, 1.80443)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	20,00
1,1	2,75
2,2	0,93
3,3	-0,73
4,4	-1,54
5,5	-2,14
6,5	-2,64
7,7	-2,91
8,8	-3,26
9,9	-3,34
11,0	-3,40
12,1	-3,42
13,2	-3,46
14,3	-3,46
15,4	-3,46
16,5	-3,46
17,6	-3,46
18,7	-3,46
19,8	-3,46
20,9	-3,46
22,0	-3,46

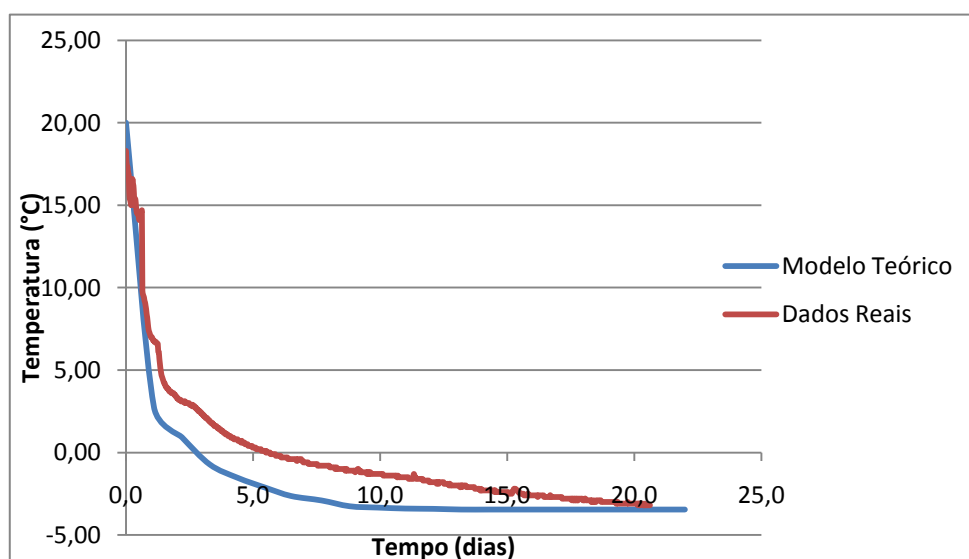


Figura 79. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 1 Cima

Tabela 14: Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 1 Fundo

Tempo (dias)	SONDA 1 - FUNDO	
	Nó 104 (1.16685, 1.15035)	
	Temperatura (°C)	
0,0	20,00	
1,1	2,01	
2,2	-0,70	
3,3	-2,47	
4,4	-3,02	
5,5	-3,62	
6,5	-3,98	
7,7	-4,00	
8,8	-4,27	
9,9	-4,27	
11,0	-4,40	
12,1	-4,54	
13,2	-4,57	
14,3	-4,59	
15,4	-4,60	
16,5	-4,61	
17,6	-4,62	
18,7	-4,61	
19,8	-4,61	
20,9	-4,61	
22,0	-4,59	

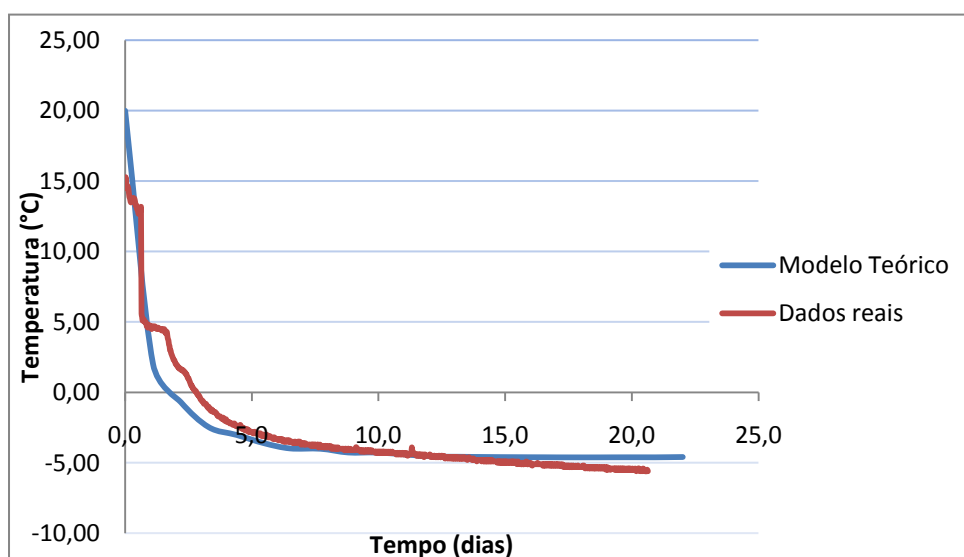


Figura 80. Gráfico modelo teórico versus dados reais - Sonda 1 Fundo

Tabela 15: Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 2 Cima

	SONDA 2 - CIMA
	Nó 221 (1.49998, 1.79839)
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	20,00
1,1	5,66
2,2	2,36
3,3	2,02
4,4	1,33
5,5	0,99
6,5	0,65
7,7	0,53
8,8	0,41
9,9	-1,99
11,0	-3,89
12,1	-3,93
13,2	-3,93
14,3	-3,93
15,4	-3,93
16,5	-3,93
17,6	-3,93
18,7	-3,93
19,8	-3,93
20,9	-3,93
22,0	-3,93

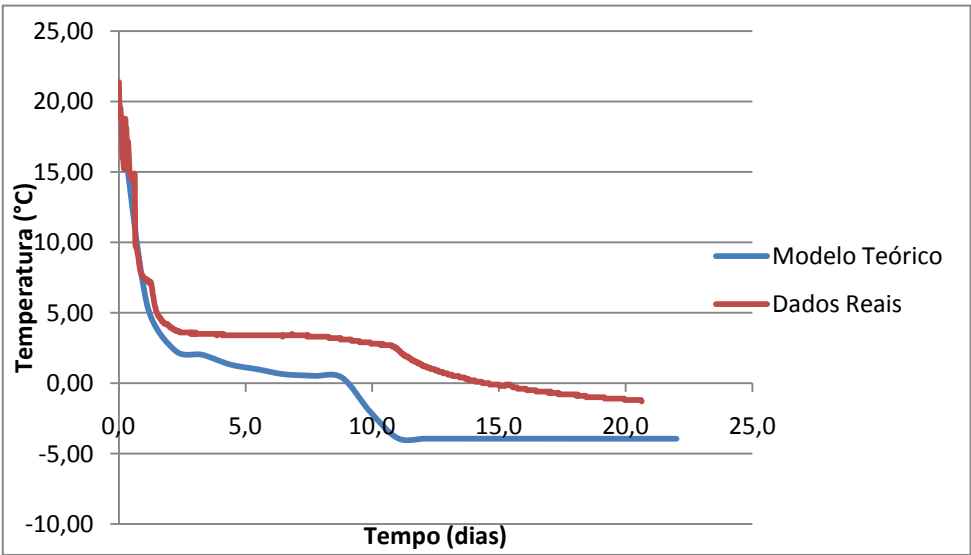


Figura 81. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 2 Cima

Tabela 16: Resultados de temperaturas do modelo teórico (água): Sonda 2 Fundo

<i>SONDA 2 - FUNDO</i>	
Nó 219 (1.49996, 1.15162)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	20,00
1,1	9,27
2,2	4,02
3,3	2,62
4,4	1,81
5,5	1,34
6,5	0,94
7,7	0,80
8,8	0,67
9,9	0,20
11,0	-2,03
12,1	-2,79
13,2	-3,52
14,3	-3,78
15,4	-3,75
16,5	-3,80
17,6	-4,14
18,7	-4,16
19,8	-4,16
20,9	-4,16
22,0	-4,16

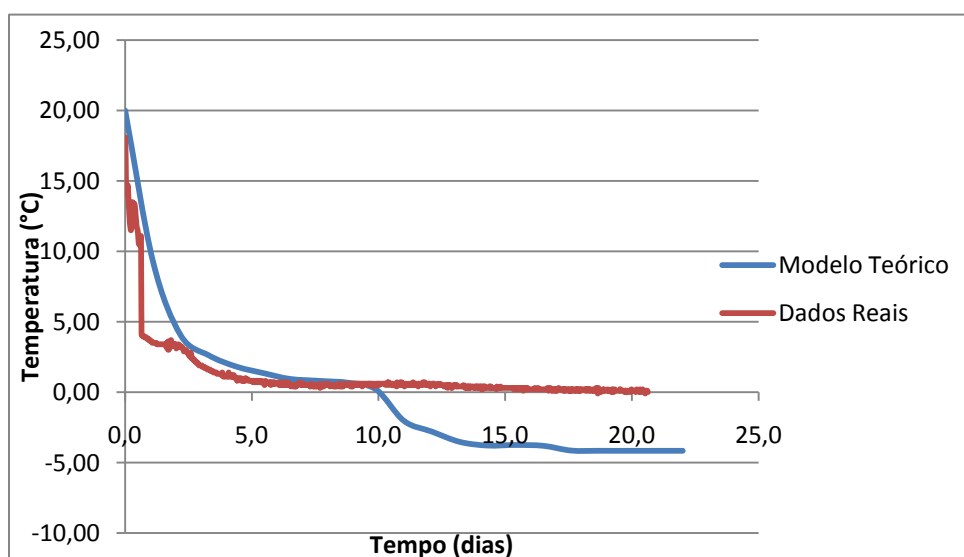


Figura 82. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 2 Fundo

### 7.6.2. Resultados da comparação do modelo teórico *versus* dados reais - 2ª Fase

Após a calibração do modelo teórico no software, é feita a comparação entre os dados reais e os dados do modelo teórico. A análise foi feita nas quatro sondas (duas superiores e duas inferiores). Seguidamente são apresentados os resultados deste confronto de dados. Primeiro é apresentada uma tabela com as temperaturas ao longo dos dias no modelo teórico, e logo após o gráfico cujo conteúdo é as duas rectas de evolução de temperaturas ao longo dos dias, nos dois modelos referidos anteriormente.

O software permite a escolha de um nó da malha do modelo, podendo ser feito o gráfico temperatura *versus* tempo, ao qual será sobreposto o evoluir das temperaturas registadas na areia, na segunda fase dos ensaios.

Tabela 17: Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 2 Cima

	SONDA 2 - CIMA
	Nó (1.06745, 1.80471)
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	18,71
0,7	1,32
1,4	0,60
2,1	0,23
2,8	0,10
3,5	0,10
4,2	0,10
4,9	0,10
5,6	0,10
6,3	0,10
7,0	0,10
7,7	0,10
8,4	0,10
9,1	0,10
9,8	0,10
10,5	0,10
11,2	0,10
11,9	0,10
12,6	0,10
13,3	0,10
14,0	0,10

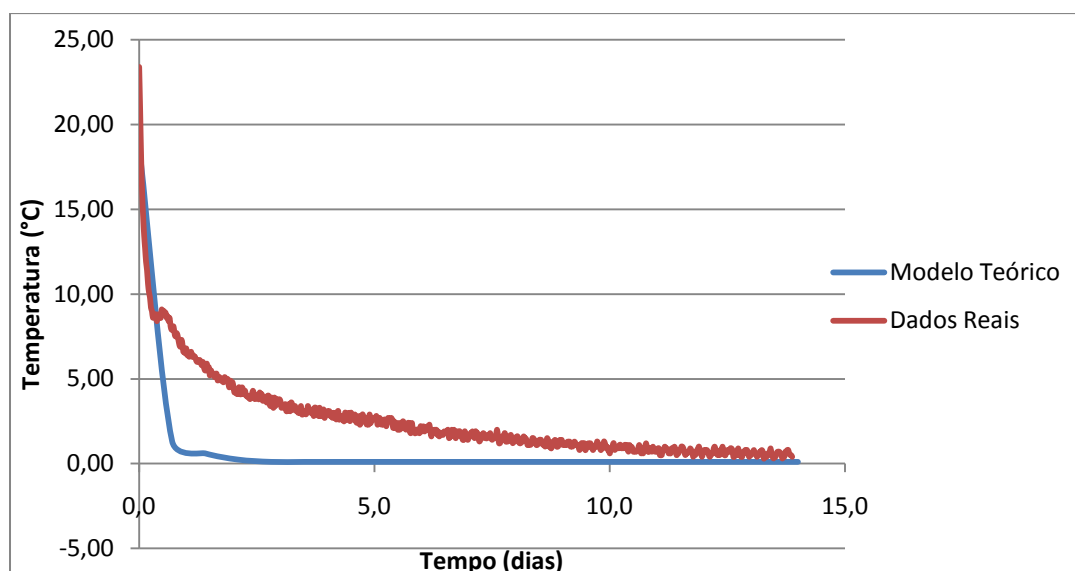


Figura 83. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 2 Cima

Tabela 18: Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 2 Fundo

SONDA 2 - FUNDO	
Nó (1.13333, 1.1349)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	5,73
0,7	-3,61
1,4	-4,17
2,1	-4,41
2,8	-4,42
3,5	-4,42
4,2	-4,42
4,9	-4,42
5,6	-4,42
6,3	-4,42
7,0	-4,42
7,7	-4,42
8,4	-4,42
9,1	-4,42
9,8	-4,42
10,5	-4,42
11,2	-4,42
11,9	-4,42
12,6	-4,42
13,3	-4,42
14,0	-4,42



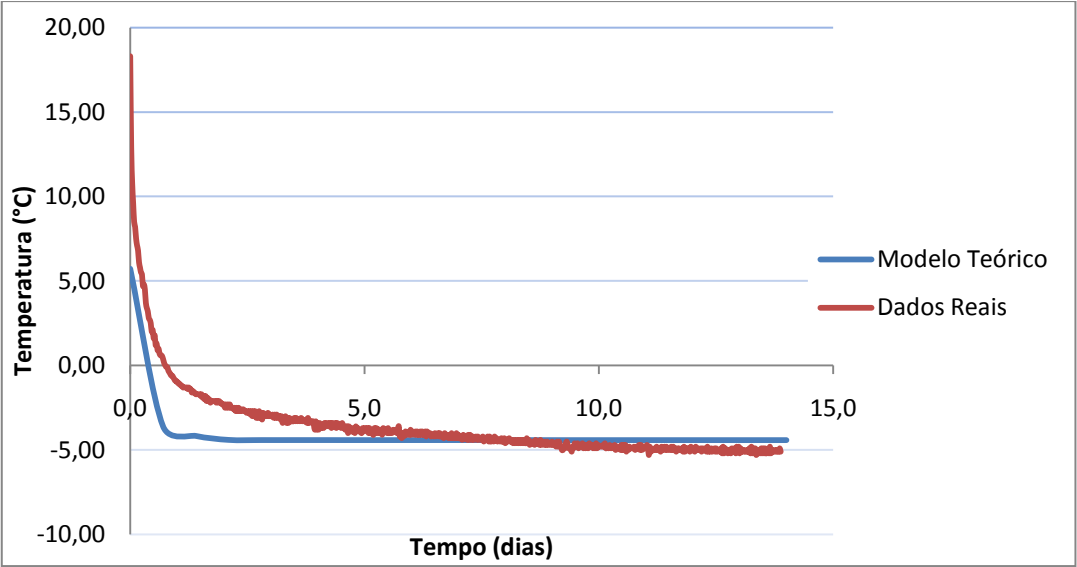


Figura 84. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 2 Fundo

Tabela 19: Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 3 Cima

SONDA 3 - CIMA	
Nó (1.70902, 1.84078)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	21,64
0,7	5,93
1,4	4,02
2,1	3,54
2,8	3,36
3,5	3,27
4,2	3,21
4,9	3,16
5,6	3,13
6,3	3,09
7,0	3,05
7,7	3,03
8,4	3,00
9,1	2,98
9,8	2,96
10,5	2,94
11,2	2,92
11,9	2,90
12,6	2,88
13,3	2,86
14,0	2,83

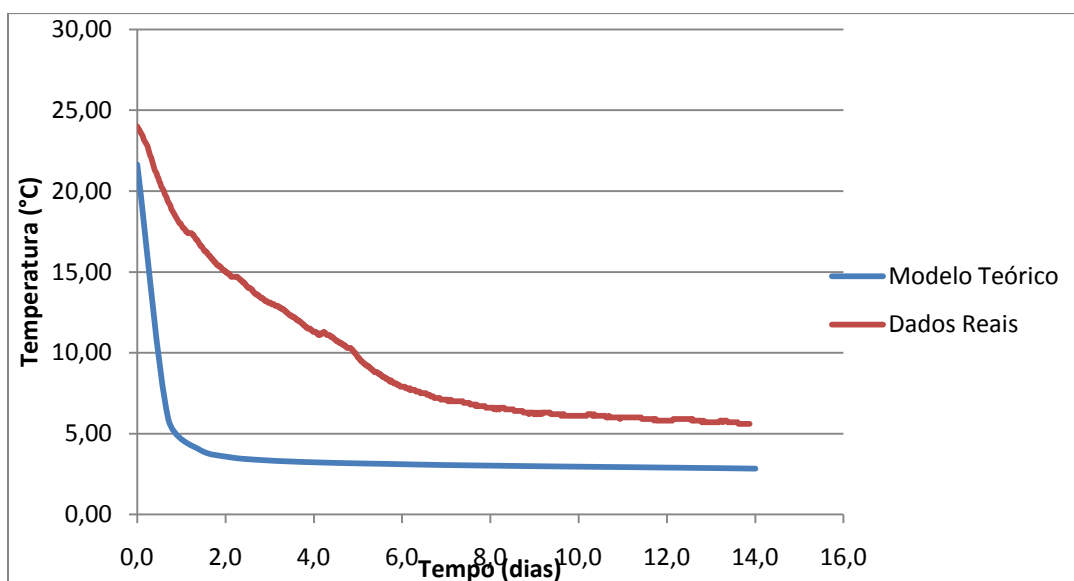


Figura 85. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 3 Cima

Tabela 20: Resultados de temperaturas do modelo teórico (areia): Sonda 3 Fundo

SONDA 3 - FUNDO	
Nó (1.70902, 1.11294)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	22,00
0,7	9,17
1,4	6,15
2,1	5,26
2,8	4,93
3,5	4,77
4,2	4,66
4,9	4,56
5,6	4,48
6,3	4,41
7,0	4,36
7,7	4,32
8,4	4,28
9,1	4,25
9,8	4,22
10,5	4,18
11,2	4,15
11,9	4,12
12,6	4,09
13,3	4,07
14,0	4,03

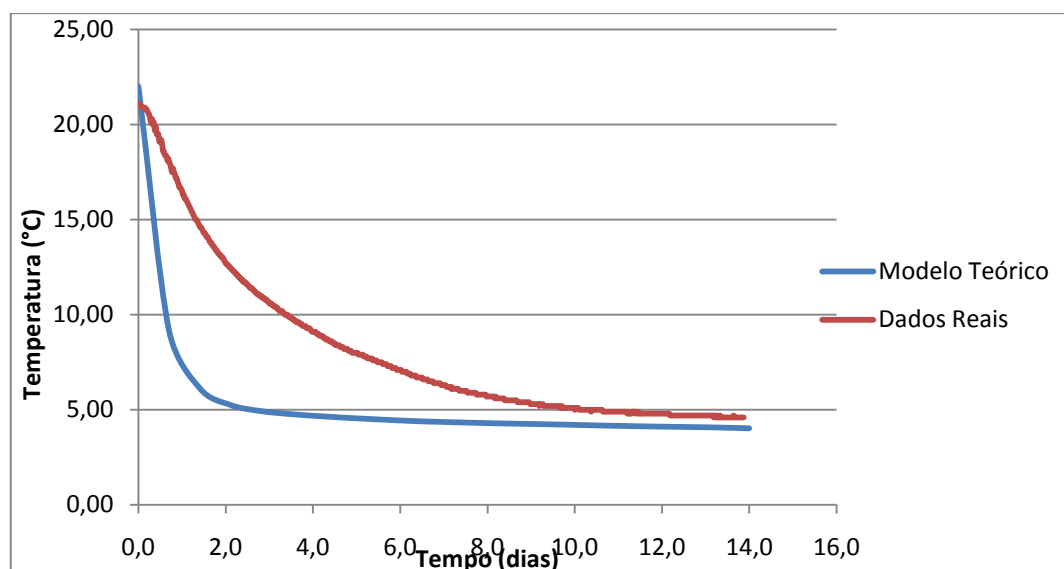


Figura 86. Gráfico modelo teórico *versus* dados reais - Sonda 3 Fundo

### 7.6.3. Consumos energéticos

Ao longo da 2ª Fase de ensaios laboratoriais foram contabilizados, diariamente, os gastos energéticos do sistema de arrefecimento. Através destes registos facilmente se consegue fazer uma análise de carácter económico relativa ao congelamento da areia. Sabendo as dimensões do reservatório e a altura a que se encontra o topo da areia, também facilmente se consegue saber o volume de areia introduzido no reservatório e, posteriormente, o gasto de energia por  $\text{m}^3$  de areia. Na Tabela 21 são apresentados os consumos diários do sistema de arrefecimento, bem como os custos diários e totais compreendidos entre o dia 03/06/2011 e 17/06/2011. Segundo a EDP - Energias de Portugal [EDP, 2011], o preço do kWh é de 0,1326€ na tarifa simples > 2,3 kVA, o que poderá variar consoante as tarifas escolhidas.

Tabela 21: Consumos registados e custos do processo de congelamento

<i>Dia</i>	<i>Consumo acumulado (kWh)</i>	<i>Consumo (kWh)</i>	<i>Custo (€/dia)</i>
03-06-2011	0,00	0,00	0,00
04-06-2011	34,30	34,30	4,55
05-06-2011	69,30	35,00	4,64
06-06-2011	105,00	35,70	4,73
07-06-2011	140,70	35,70	4,73
08-06-2011	175,70	35,00	4,64
09-06-2011	210,70	35,00	4,64
10-06-2011	245,00	34,30	4,55

11-06-2011	279,30	34,30	4,55	
12-06-2011	315,00	35,70	4,73	
13-06-2011	349,30	34,30	4,55	
14-06-2011	383,60	34,30	4,55	
15-06-2011	419,30	35,70	4,73	
16-06-2011	453,60	34,30	4,55	
17-06-2011	489,30	35,70	4,73	
	TOTAL	489,30	64,88	€

O reservatório utilizado tem cerca de  $0,90 \text{ m}^3$  sendo utilizados cerca de  $0,75 \text{ m}^3$  de areia. Fazendo a conversão obtemos um custo de cerca de  $86,5\text{€/m}^3$ , no total de dias em que foi efectuado o congelamento. Isto equivale a um custo de cerca de  $6,25\text{€/m}^3$  de areia, por dia, em média. Obviamente que este valor constitui o consumo do equipamento e não o custo unitário a considerar para uma obra, nesse caso é necessário modelar a geometria real, tal como se fez aqui para o tanque de ensaios.

## 7.7. Discussão

De seguida é feita uma discussão em relação a todos os ensaios realizados, tentando referenciar todos os pontos-chave que tenham interferência directa ou indirecta nos resultados obtidos. Procura-se encontrar causas de algumas falhas, resultados inesperados e o seu confronto com determinados pontos.

A primeira fase dos ensaios está relacionada com o congelamento de água no reservatório R1. Analisando os resultados obtidos nas 4 sondas instaladas, o registo de temperaturas ao longo dos dias em cada uma delas, podemos dizer, como seria de esperar, que as temperaturas atingidas são menores nas sondas "1 - cima" e "1 - fundo", uma vez que se encontram mais próximas dos tubos de congelamento. As sondas de fundo atingem temperaturas mais baixas que as sondas de cima. Isto poderá acontecer por duas razões: a primeira, pelo facto de a zona de fundo do reservatório se encontrar já numa temperatura menor que a zona do topo (contacto com o ar livre), apresentando-se assim como uma zona com "maior isolamento", que por sua vez atinge temperaturas menores que as das sondas superiores; a segunda razão poderá ter a ver com o facto de o tubo de congelamento proporcionar saídas de temperatura menor na zona final do tubo, do que a zona inicial do mesmo. Assim e do mesmo modo que a suposição anterior, as

temperaturas serão mais baixas nas zonas próximas do final dos tubos de congelamento. Este "problema" de diferenças de temperaturas, em locais diferentes, poderá ser reduzido, por exemplo admitindo/impondo distâncias menores entre tubos de congelamento. O raio de acção dos tubos, nos 22 dias de ensaios realizados, poderá também ser diferente caso o processo de congelamento continuasse. Isto levaria talvez a uma diminuição de temperaturas nas quatro sondas instaladas. Apesar disso, é possível, através da análise dos gráficos construídos a partir das temperaturas registadas, prever o comportamento de congelamento. É notório que até ao terceiro/quarto dia de congelamento, se regista uma diminuição acentuada das temperaturas e que a partir dessa data o congelamento se dá de um modo mais lento. Isto não significa, necessariamente, que a máquina tenha maior rendimento de congelamento nestes dias iniciais. As diferenças de temperatura atingidas é que são de grandeza superior.

O registo de temperaturas pode também ser discutido, uma vez que a posição das sondas poderá ter sido alterada pois a sua colocação é feita em água, o que dá uma certa liberdade á sonda em movimentar-se, com os fluxos que possam surgir. Isto poderá ter alterações significativas no registo das temperaturas. Uma posição mais afastada do tubo, como já dito anteriormente, poderá ser suficiente para que a temperatura se altere. Deste modo, quando foi feita a calibração do modelo, a escolha dos pontos representativos das sondas pode não coincidir, de uma forma minuciosa com a realidade da sua posição inicial.

Relativamente à comparação do modelo teórico *versus* dados reais (1ª fase dos ensaios), existem algumas explicações para as pequenas discrepâncias visíveis nos gráficos construídos. Para além da colocação e oscilação da posição das sondas, já discutido anteriormente, existem alguns factores que levaram a que as linhas dos gráficos não fossem totalmente iguais, nos dois modelos (teórico *versus* real). A primeira razão é o facto de que no modelo teórico a cota de água se encontra ao nível da cota superior do reservatório, ao contrário da realidade, em que a cota da superfície da água está a cerca de 20 cm do topo do reservatório. Isto poderá condicionar o registo de temperaturas das sondas superiores, uma vez que o ar e a água têm diferentes propriedades e temperaturas iniciais, e portanto, ao introduzirem-se valores diferentes, os resultados

também serão diferentes. Outra possibilidade será o facto de as condições fronteira criadas não estarem correctas em relação ao que se passa na realidade. Por exemplo a temperatura de contacto entre as paredes do reservatório e a água foi modelada em  $1^{\circ}\text{C}$ , valor que poderá não estar correcto. Observando atentamente os gráficos de comparação dos dois modelos (real e teórico) nas quatro sondas, consegue-se perceber que as temperaturas reais são menores que as temperaturas modeladas (praticamente em todos os pontos dos gráficos). A causa desta manifestação poderá residir na temperatura introduzida nos tubos de congelamento, no programa de cálculo. Se baixarmos esta temperatura imposta pelo utilizador, certamente iremos baixar as temperaturas registadas nos pontos relativos às sondas.

Outro ponto interessante é o facto de se registar, nas sondas colocadas no meio dos dois tubos de congelamento (sonda 2 - cima e 2 - fundo), por volta do décimo dia de congelamento, um patamar brusco nos gráficos, nomeadamente nas linhas representativas do modelo teórico, ou seja a modelação. Isto acontece pois este ponto corresponde ao momento em que os bolbos formados pelo congelamento de cada tubo se intersectam. Assim sendo, e reafirmando o que já foi dito anteriormente, colocando os tubos de congelamento mais próximos, as temperaturas obtidas serão melhores, ou seja com valores mais baixos, uma vez que os raios de acção de cada tubo se intersectam. Na realidade isto não aconteceu, uma vez que as sondas ficaram colocadas fora deste alcance (intersecção dos bolbos).

Relativamente à permeabilidade da areia, calculada pelos dois métodos (carga constante e carga variável), e analisando a Figura 52 do capítulo 7, referente aos intervalos padrão dos coeficientes de permeabilidade, obtemos uma ordem de grandeza de  $10^{-2}$ , ou seja relativa a uma areia com capacidade média no que toca ao coeficiente de permeabilidade. Os dois métodos utilizados para obter estes resultados revelaram-se bastante precisos e fáceis de executar, com valores muito próximos nos dois casos. No caso da fórmula empírica de Hazen, o valor obtido também é da ordem de grandeza dos anteriores, divergindo ligeiramente nas unidades consoante o coeficiente de Hazen escolhido.

O sistema de arrefecimento, de circuito fechado, e com propilenoglicol como produto refrigerante, atinge temperaturas negativas na ordem dos  $-20^{\circ}\text{C}$ . As temperaturas, num circuito aberto, como por exemplo num circuito de azoto líquido, seriam muito mais baixas. O raio dos tubos de congelamento, caso fosse maior do que os usados nos ensaios, poderia fornecer mais rendimento à máquina, obtendo-se raios de acção de congelamento maiores, e portanto maior área de congelamento.

Analisando os gráficos relativos ao congelamento de areia, nomeadamente na sonda 3 - cima e sonda 3 - fundo, é notório que a inclinação inicial difere relativamente aos gráficos da sonda 2 - cima e sonda 2 - fundo da 1ª fase do congelamento (com água). Em conjunto com o registo diário das temperaturas pode-se afirmar que, estando mais longe dos tubos de congelamento, as variações de temperatura diárias são portanto menores, uma vez que as sondas 3 (cima e fundo) se encontram numa posição mais afastada comparando com as sondas a meio do reservatório usadas na 1ª fase do congelamento (com água), onde os tubos se encontravam mais próximos. Daí a menor inclinação no caso das sondas introduzidas a meio do reservatório na 2ª fase. Relativamente às sondas que se encontram na proximidade dos tubos de congelamento (sonda 1 - cima e 1 - fundo na 1ª fase, e sonda 2 - cima e 2 - fundo no caso da 2ª fase dos ensaios de congelamento), o comportamento não difere muito nos dois casos, registando-se temperaturas com oscilação de 1 a  $2^{\circ}\text{C}$ , sendo menores no caso da areia.

Ao nível económico o valor apresentado é apenas referente ao gasto energético desde que o processo de congelamento da areia foi iniciado, não tendo sido contabilizado qualquer gasto de materiais utilizados, nem o custo do equipamento. A análise económica feita serve portanto para obter um valor padrão do que será o gasto energético num processo de congelamento deste género. Alterações no tipo de refrigerante utilizado, na dimensão dos tubos e/ou na dimensão dos reservatórios, serão responsáveis, obviamente, por valores diferentes dos obtidos.





## 8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 8.1. Conclusões gerais

Sabendo que a técnica de congelamento de solos é uma técnica pouco aprofundada no território português, este trabalho começou por tentar descobrir aquilo que já se faz pelo mundo fora no que respeita a esta técnica de melhoramento de solos.

Os objectivos estipulados representam o arranque do estudo/conhecimento de uma temática inovadora, neste caso o congelamento de solos. Objectivos como o registo de temperaturas em diversos materiais congelados (água e areia) foram satisfatoriamente alcançados.

Utilizou-se, ainda, um programa de software para modelar o comportamento de um reservatório cheio de água e de outro cheio de areia. Esses reservatórios foram, posteriormente, congelados na prática com o sistema de arrefecimento da Universidade de Aveiro. Este programa permitiu estabelecer a comparação entre os resultados teóricos e os resultados práticos.

Teoricamente a técnica de congelamento de solos é bastante favorável quando nos deparamos com uma perspectiva de utilização de uma técnica de melhoramento de solos. Existem inúmeras possibilidades de tratar um solo, e a presente técnica revelou ser mais uma alternativa às já conhecidas, com grandes vantagens ambientais.

No presente documento é feita uma análise prática a nível de temperaturas, quer em água, quer em areia congelada. Através destes ensaios foi possível distinguir diversas características resultantes de um processo de congelamento. Materiais diferentes implicam tempos diferentes de congelamento, diferentes temperaturas atingidas e, consequentemente, diferenças ao nível económico também.

Foram sentidas algumas dificuldades ao longo da realização deste trabalho, nomeadamente na modelação no programa de cálculo utilizado, uma vez que o manual de utilizador não está explícito em alguns dos pontos importantes da modelação.

Também a nível de laboratório foram observadas algumas dificuldades. Inicialmente foi o facto de o sistema de arrefecimento ter sido montado de origem, o que de certo modo requeria alguma "especialização" e conhecimento na área mecânica, sendo necessário proceder a fases iniciais de testes, que de uma maneira geral atrasam a recolha de resultados.

Os resultados obtidos no confronto modelo teórico *versus* dados reais dos ensaios experimentais revelam-se bastante importantes, numa técnica que é pouco ou nada utilizada em Portugal. É assim possível a obtenção de parâmetros de solos congelados, tendo como referência os modelos teóricos concretizados.

De uma maneira geral, os objectivos propostos foram atingidos, e o nível de conhecimento relativamente a esta técnica foi adquirido.

É facto que o processo de congelamento de solos passa muito para além de uma simples análise térmica de um solo. Espera-se que, através deste documento, novos processos possam ser testados, tendo como base alguns resultados já adquiridos.

## **8.2. Desenvolvimentos futuros**

No futuro seria interessante proceder a diversos outros ensaios para um melhor aprofundamento de conhecimentos relativos à técnica de congelamento. Para além de se poderem conhecer/deduzir as propriedades mecânicas de uma areia congelada, o estudo poderá ser feito também a nível de diferentes tipos de solos e respectiva comparação. Poderá ser analisado, por exemplo, o evoluir de temperaturas em diferentes tipos de solo, como por exemplo em solos argilosos e em solos do tipo cascalho. A modelação permite também fazer essa análise teórica, uma vez que facilmente se modifica as propriedades dos materiais, obtendo, assim, um possível cenário do que irá suceder na realidade.

Poderá também ser feito um outro estudo introduzindo os tubos de congelamento noutras posições no reservatório, determinando assim a influência que a posição tem no raio de acção do tubo. O número de tubos poderá também ser

modificado, e posteriormente poderá ser feito um estudo económico, uma vez que utilizando mais tubos, o tempo de congelamento pode diminuir, subindo no entanto o custo de congelamento. O propilenoglicol poderá também ser substituído por outro produto, concluindo-se se terá vantagens ou desvantagens relativamente ao que já foi utilizado.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airliquide - Disponível em: <http://www.airliquide.pt/> consultado em Outubro de 2010

Al-Houri, Z.M.; Barber, M.E.; Yonge, D.R.; Ullman, J.L.; Beutel, M.W. - Impact of frozen soils on the performance of infiltration treatment facilities. Cold Region Science and Technology. Vol. 59 (2009), p. 51-57.

Almeida, Nuno Gonçalo Marques De - Técnicas de Melhoramento de Solos - Parte 1 Oeiras: Construlink Press, 2003.

Andersland, Orlando B.; Ladanyi, Branko - Frozen Ground Engineering: John Wiley and Sons, 2004 Disponível em: <http://books.google.pt>

Arenson, Lukas U.; Sego, David C. - Freezing processes for a coarse sand with varying salinities. Proceedings of the Cold Regions Engineering & Construction Conference, Edmonton, Alta., 16-19 Maio. (2004).

Arenson, Lukas U.; Springman, Sarah M.; Sego, Dave C. - The Rheology of Frozen Soils. Applied Rheology. Vol. 17 Issue 1 (2007), p. 12147 1-14.

ASTM D 2487-85 Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes - Philadelphia: ASTM - American Society for Testing and Materials, 1985.

Barbosa, L.; Silva, L.; Benta, A. - Sistema de congelamento de solos. GeoBioTec. Universidade de Aveiro. (2010).

Bayer, Franz; Muller, Benno- Infrastructure Ground Freezing Technology, 2010.

Benta, A. - Apontamentos para a disciplina de Tratamento e Reforço de Maçicos - Dep. Eng. Civil - Universidade de Aveiro. (2010).

Carreto, Joana Rodrigues- Jet Grouting. Uma técnica em desenvolvimento: VII Congresso Nacional de Geotecnia Porto, 2000.

Cavalcante, Erinaldo Hilário- Mecânica dos Solos II - Notas de Aula - Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2006.

Chamberlain, Edwin J.; Asce, M. - Shear Strenght in the Zone of Freezing in Saline Soils. ASCE Conference - Arctic'85 - San Francisco, California. (1985).

Constructor, The - Latest trends in ground improvement techniques Disponível em: <http://theconstructor.org/> consultado em Setembro 2010

Cristelo, Nuno - Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal Tese de Mestrado da Universidade do Minho, 2001.

EDP - Disponível em: [www.edp.pt](http://www.edp.pt) consultado em Junho 2011

Enson, Carl F.; Engineers, U.S. Army Corps Of- Engineering and Design - Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities: Engineer Technical Letter 1110-1-185, 1999.

Esch, David C. - Thermal Analysis, Construction, and Monitoring Methods for Frozen Ground: ASCE Publications, 2004 Disponível em: <http://books.google.pt>

Felizardo, David Alexandre Da Silva - Manual interactivo de ensaios *In Situ* para caracterização de maciços Aveiro: Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro, 2008.

Freitag, Dean R.; Mcfadden, Terry T. - Introduction to Cold Regions Engineering: ASCE Publications, 1997 Disponível em: <http://books.google.pt>

Geo-Slope©- Thermal Modeling with TEMP/W 2007: An Engineering Methodology Fourth Edition. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE Internacional Ltd, 2010.

Hamzah, M.O. - Conventional Methods for Highway Soil Stabilization Tese de Mestrado da Universidade de Strathclyde, Glasgow, 1983.

Harris, John S. - Ground Freezing In Practice: Thomas Telford, 1995 Disponível em: <http://books.google.pt>

Hazirbaba, Kenan; Gullu, Hamza - California Bearing Ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. Cold Region Science and Technology. Vol. 63 (2010), p. 50-60.

Impe, W.F. Van - Soil Improvement Techniques and Their Evolution Rotterdam: Balkema, 1989.

Isep- ISEP - Laboratórios de Física - Condutividade térmica - DEFI-NRM-1019 - Versão: 02 Instituto Superior de Engenharia do Porto - Departamento de física, 2008.

Keller - Disponível em: <http://www.keller.co.uk> consultado em Março 2011

Kirsch, F.; Richter, Th. - Ground freezing for tunnelling under historical structures - ICSMGE, Alexandria/Egypt Disponível em: [www.gudconsult.de](http://www.gudconsult.de) consultado em Abril 2011

Knutsson, Gert - Trends in the acidification of groundwater Stockholm, 1994.

Kochen, Roberto- Túneis....E mais! : GeoCompany, 2010.

Lidong-Wei; Fanju-Hong; Wangren-He - Research on visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures. Cold Region Science and Technology. (2010).

Linde - Disponível em: <http://www.linde.pt> consultado em Outubro 2010

LNEC E 240 - 1970 - Solos. Classificação para fins rodoviários. - (1970).

Lopes, Pedro - Projecto Geotécnico - Execução de fundações profundas - A tecnologia Cutter Soil Mixing Lisboa: Tese de Mestrado da Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

Loureiro, Telma - Aspectos Geotécnicos na Construção de Túneis em Áreas Urbanas Lisboa: Tese de Mestrado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, 2008.

Mackiewicz, S. M.; Iii, W. M. Camp- Ground Modification: How much improvement? [www.kleinfelder.com](http://www.kleinfelder.com), 2007.

Mahar, L.J.; Stuckert, B.J.A. - Strenght and deformation behavior of frozen saline sand and gravel. Civil Engineering in the Arctic Offshore '85. ASCE. (1985), p. 57-65.

Moretrench - Disponível em: <http://www.moretrench.com/> consultado em Novembro 2010

Neves, Manuel João Niza Das - Técnicas de Recalçamento e Refoço de Fundações - Metodologias, Dimensionamento e Verificações de Segurança Lisboa: Tese de Mestrado da Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

Nguyen, A.D.; Arenson, L.U.; Sego, D.C.; Biggar, K.W. - Strenght variations within artificially frozen soils. Proceedings of 59th Canadian Geotechnical Conference. (2006), p. 1048-1053.

NP-83 - Determinação da densidade das partículas - solos, 1965.

NP-84 - Determinação do teor em água - solos, 1965.

NP EN 933-1 Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração., 2000.

NP EN 933-2 Ensaaios para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas., 1999.

NP EN 1097-3 - Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios, 2002.

Pires, Paulo Alexandre Morais - Teoria e Prática de Técnicas de Construção, Conservação e Restauro de Edifícios do Século XVIII: estudos sobre uma capela setecentista de Samodães (Lamego) Vila Real: Tese de Mestrado da Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro - UTAD, 2009.

Qi, Jilin; Hu, Wei; Ma, Wei - Experimental study of a pseudo-preconsolidation pressure in frozen soils. Cold Region Science and Technology. Vol. 60 (2010), p. 230-233.

Raju, V.R.; Valluri, Sridhar- Practical Applications of Ground Improvement: Engineering of ground & environmental geotechniques (S EG<sup>2</sup>) Hyderabad, 2008. [Consult. 20 de Abril de 2011 às 11h00].

Schultz, Michael; Gilbert, Michael; Hass, Helmut- Ground freezing - principles, applications and practices: Tunnels & Tunnelling International, 2008.

Sheng, Y.; Peng, W.; Wen, Z.; Fukuda, M. - Physical properties of frozen soils measured using ultrasonic techniques. ICOP 2003 - PERMAFROST. (2003), p. 1035-1038.

Silva, Elisa Maria De Jesus - Ensaio pressiométrico: metodologia de ensaio e calibração do equipamento - Dep. Eng. Civil - EST/UAlg. (2001).

Wolfe, Louis H.; Thieme, James O. - Physical and Thermal Properties of Frozen Soil and Ice. Society of Petroleum Engineers Journal. Vol. 231 (1964).

Yu, W.B. ; Zhu, Y.L.; Zhang, J.M.; He, P - Studied on using a pressuremeter test to determine the mechanical properties of frozen soils. Journal of Glaciology and Geocryology. Vol. 22 (2000), p. 366-371.

Yu, Wenbing; Lai, Yuanming; Zhu, Yuanlin; Li, Haipeng; Zhang, Jianming; Zhang, Xuefu; Zhang, Shujuan - In situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter. Cold Region Science and Technology. Vol. 34 (2002), p. 179-189.

Zhang, Shujuan; Lai, Yuanming; Sun, Zhizhong; Gao, Zhihua - Volumetric strain and strenght behavior of frozen soils under confinement. Cold Region Science and Technology. Vol. 47 (2007), p. 263-270.

Zitrec - Disponível em: <http://www.zitrec.com> consultado em Outubro 2010



## **ANEXOS**



## ANEXO I - REGISTO DE TEMPERATURAS (1ª FASE)

Tabela 22: Registo de temperaturas - 1ª fase - congelamento de água

Data	Hora	Sonda 1	Fundo	Sonda 2	Fundo	Sonda 1	Cima	Sonda 2	Cima
		Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.
31-01-2011	19:38	0,00	14,8	0,00	18,1	0,00	18,3	0,00	21,4
31-01-2011	23:38	0,17	13,9	0,17	12,6	0,17	15,3	0,17	15,9
01-02-2011	00:08	0,19	13,8	0,19	12,0	0,19	15,1	0,19	15,4
01-02-2011	23:58	1,17	4,7	1,17	3,5	1,17	6,7	1,17	7,3
02-02-2011	00:28	1,19	4,6	1,19	3,5	1,19	6,7	1,19	7,2
02-02-2011	23:58	2,17	1,7	2,17	3,3	2,17	3,1	2,17	3,8
03-02-2011	00:28	2,19	1,7	2,19	3,2	2,19	3,1	2,19	3,8
03-02-2011	23:58	3,17	-0,8	3,17	1,7	3,17	2,1	3,17	3,5
04-02-2011	00:28	3,19	-0,8	3,19	1,7	3,19	2,1	3,19	3,5
04-02-2011	23:58	4,17	-2,2	4,17	1,1	4,17	0,9	4,17	3,4
05-02-2011	00:28	4,19	-2,2	4,19	1,1	4,19	0,9	4,19	3,4
05-02-2011	23:58	5,17	-2,9	5,17	0,8	5,17	0,2	5,17	3,4
06-02-2011	00:28	5,19	-2,9	5,19	0,8	5,19	0,2	5,19	3,4
06-02-2011	23:58	6,17	-3,4	6,17	0,6	6,17	-0,3	6,17	3,4
07-02-2011	00:28	6,19	-3,3	6,19	0,5	6,19	-0,3	6,19	3,4
07-02-2011	23:58	7,17	-3,7	7,17	0,5	7,17	-0,6	7,17	3,4
08-02-2011	00:28	7,19	-3,7	7,19	0,5	7,19	-0,7	7,19	3,4
08-02-2011	23:58	8,17	-4,0	8,17	0,5	8,17	-0,9	8,17	3,3
09-02-2011	00:28	8,19	-3,9	8,19	0,5	8,19	-0,9	8,19	3,3
09-02-2011	23:58	9,17	-4,0	9,17	0,6	9,17	-1,1	9,17	3,1
10-02-2011	00:28	9,19	-4,1	9,19	0,5	9,19	-1,1	9,19	3,0
10-02-2011	23:58	10,17	-4,3	10,17	0,6	10,17	-1,4	10,17	2,8
11-02-2011	00:28	10,19	-4,2	10,19	0,6	10,19	-1,4	10,19	2,8
11-02-2011	23:58	11,17	-4,4	11,17	0,6	11,17	-1,6	11,17	2,1
12-02-2011	00:28	11,19	-4,4	11,19	0,5	11,19	-1,6	11,19	2,1
12-02-2011	23:58	12,17	-4,6	12,17	0,6	12,17	-1,8	12,17	1,1
13-02-2011	00:28	12,19	-4,5	12,19	0,6	12,19	-1,8	12,19	1,1
13-02-2011	23:58	13,17	-4,7	13,17	0,4	13,17	-2,1	13,17	0,5
14-02-2011	00:28	13,19	-4,7	13,19	0,4	13,19	-2,0	13,19	0,5
14-02-2011	23:58	14,17	-4,9	14,17	0,4	14,17	-2,3	14,17	0,1
15-02-2011	00:28	14,19	-4,8	14,19	0,4	14,19	-2,3	14,19	0,1
15-02-2011	23:58	15,17	-5,0	15,17	0,3	15,17	-2,5	15,17	-0,2

Data	Hora	Sonda 1	Fundo	Sonda 2	Fundo	Sonda 1	Cima	Sonda 2	Cima
		Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.
16-02-2011	00:28	15,19	-5,0	15,19	0,3	15,19	-2,5	15,19	-0,2
16-02-2011	23:58	16,17	-5,1	16,17	0,3	16,17	-2,6	16,17	-0,5
17-02-2011	00:28	16,19	-5,1	16,19	0,2	16,19	-2,6	16,19	-0,5
17-02-2011	23:58	17,17	-5,1	17,17	0,2	17,17	-2,8	17,17	-0,7
18-02-2011	00:28	17,19	-5,2	17,19	0,2	17,19	-2,8	17,19	-0,7
18-02-2011	23:58	18,17	-5,3	18,17	0,1	18,17	-2,9	18,17	-0,9
19-02-2011	00:28	18,19	-5,3	18,19	0,2	18,19	-2,9	18,19	-0,9
19-02-2011	23:58	19,17	-5,4	19,17	0,1	19,17	-3,0	19,17	-1,1
20-02-2011	00:28	19,19	-5,4	19,19	0,0	19,19	-3,0	19,19	-1,1
20-02-2011	23:58	20,17	-5,6	20,17	0,1	20,17	-3,1	20,17	-1,2
21-02-2011	00:28	20,19	-5,5	20,19	0,2	20,19	-3,1	20,19	-1,2
21-02-2011	10:58	20,63	-5,6	20,63	0,0	20,63	-3,2	20,63	-1,3

## ANEXO II - PROPRIEDADES TÉRMICAS - TABELAS MANUAL SOFTWARE

Tabela 23: Condutividade Térmica de alguns materiais (fonte: adaptado de GEO-SLOPE©, 2010)

Material	Conductivity
	kJ/(dia.m.°C)
Water	55,27
Ice	192,7
Air (dry still)	2,07
Snow	
loose, new	7,43
on ground	10,45
dense, compacted	29,37
Soil and rock minerals	
Shale	129,6
Evaporites	466,6
Limestone	112-432
Dolomite	432
Sandstone	155-86,4
Schist	138,24
Gneiss	216
Greenstone	285,12
Slate	328,3
Argillite	285,12
Quartzite	388,8-613
Granite	146,9-345,6
Diabase	181,4
Gabbro	216
Grandiorite	224,6

Tabela 24: Capacidade térmica volumétrica de alguns materiais (fonte: adaptado de GEO-SLOPE©, 2010)

Material	Volumetric Heat Capacity
	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
Water	4187
Ice	1880
Air	1,25
Soil minerals	1875
Organic soil minerals	2520
Extruded polystyrene insulation	43,5
Concrete	2010
Asphalt	2520
Snow, fresh	209
Snow, drifted and compacted	523,5
Granite	2490
Limestone	3285
Dolomite	2510
Sandstone	2510
Shale	1840
Glass	1760
Steel	3890
Wood	523

## ANEXO III - REGISTO DE TEMPERATURAS (2ª FASE)

Tabela 25: Registo de temperaturas - 2ª fase - congelamento de areia

Data	Hora	Sonda 2	Fundo	Sonda 3	Fundo	Sonda 2	Cima	Sonda 3	Cima
		Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.	Dias	Temp.
03-06-2011	13:56	0,00	18,3	0,00	21,1	0,00	23,4	0,00	24,0
03-06-2011	23:56	0,42	2,7	0,42	19,5	0,42	8,6	0,42	21,2
04-06-2011	00:26	0,44	2,5	0,44	19,5	0,44	8,7	0,44	21,1
04-06-2011	23:56	1,42	-1,7	1,42	14,6	1,42	5,5	1,42	16,7
05-06-2011	00:26	1,44	-1,7	1,44	14,6	1,44	5,9	1,44	16,6
05-06-2011	23:56	2,42	-2,6	2,42	11,7	2,42	4,3	2,42	14,3
06-06-2011	00:26	2,44	-2,7	2,44	11,7	2,44	4,1	2,44	14,3
06-06-2011	23:56	3,42	-3,3	3,42	10,0	3,42	3,0	3,42	12,4
07-06-2011	00:26	3,44	-3,3	3,44	9,9	3,44	3,4	3,44	12,4
07-06-2011	23:48	4,40	-3,7	4,40	8,6	4,40	2,9	4,40	11,0
08-06-2011	00:18	4,42	-3,4	4,42	8,6	4,42	2,6	4,42	11,0
08-06-2011	23:48	5,40	-3,7	5,40	7,6	5,40	2,1	5,40	8,8
09-06-2011	00:18	5,42	-3,9	5,42	7,6	5,42	2,5	5,42	8,8
09-06-2011	23:48	6,40	-4,0	6,40	6,7	6,40	1,8	6,40	7,6
10-06-2011	00:18	6,42	-4,2	6,42	6,7	6,42	1,8	6,42	7,5
10-06-2011	23:48	7,40	-4,4	7,40	6,0	7,40	1,5	7,40	6,9
11-06-2011	00:18	7,42	-4,2	7,42	6,0	7,42	1,7	7,42	6,9
11-06-2011	23:48	8,40	-4,4	8,40	5,5	8,40	1,4	8,40	6,5
12-06-2011	00:18	8,42	-4,5	8,42	5,5	8,42	1,3	8,42	6,5
12-06-2011	23:48	9,40	-4,9	9,40	5,2	9,40	1,2	9,40	6,2
13-06-2011	00:18	9,42	-5,1	9,42	5,2	9,42	1,2	9,42	6,2
13-06-2011	23:48	10,40	-4,8	10,40	5,0	10,40	0,7	10,40	6,1
14-06-2011	00:18	10,42	-4,9	10,42	5,0	10,42	1,1	10,42	6,1
14-06-2011	23:48	11,40	-4,8	11,40	4,9	11,40	0,8	11,40	6,0
15-06-2011	00:18	11,42	-5,0	11,42	4,9	11,42	0,5	11,42	6,0
15-06-2011	23:48	12,40	-4,9	12,40	4,7	12,40	1,0	12,40	5,9
16-06-2011	00:18	12,42	-5,1	12,42	4,7	12,42	0,7	12,42	5,9
16-06-2011	23:48	13,40	-5,2	13,40	4,6	13,40	0,6	13,40	5,7
17-06-2011	00:18	13,42	-5,0	13,42	4,6	13,42	0,9	13,42	5,7
17-06-2011	11:18	13,88	-5,1	13,88	4,6	13,88	0,4	13,88	5,6